



Maicon de Souza Marques

**O ESTUDO DA ESTABILIDADE DE ENCOSTAS NA RUA MATO GROSSO NO
BAIRRO DE QUITANDINHA, PETRÓPOLIS – RJ, ATRAVÉS DO RADAR DE
PENETRAÇÃO NO SOLO (GPR)**

Trabalho de Conclusão de Curso
(Bacharelado em Geologia)

UFRJ
Rio de Janeiro
2016



UFRJ

Maicon de Souza Marques

**O ESTUDO DA ESTABILIDADE DE ENCOSTAS NA RUA MATO GROSSO NO
BAIRRO DE QUITANDINHA, PETRÓPOLIS – RJ, ATRAVES DO RADAR DE
PENETRAÇÃO NO SOLO (GPR)**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação em Geologia do Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, apresentado como requisito necessário para obtenção do grau de Bacharel em Geologia.

Orientadora:

Prof^a Dra. Gleide Alencar do Nascimento
Dias

Rio de Janeiro
Dezembro 2016

MARQUES, Maicon de Souza

O estudo da estabilidade de encostas na rua Mato Grosso no Bairro de Quitandinha, Petrópolis – RJ, através do Radar de Penetração do solo (GPR) / Maicon de Souza Marques - Rio de Janeiro: UFRJ / IGeo, 2016.xvii, 71p : il.; 30cm

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Geologia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências, Departamento de Geologia, 2016.

Orientador: Profª Dr. Gleide Alencar Dias do Nascimento.

1. Geologia. 2. Instituto de Geociências – Trabalho de Conclusão de Curso. I. Profª Dr. Gleide Alencar Dias do Nascimento. II.

Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências, Programa de Pós-graduação em Geologia. III. O estudo da estabilidade de encostas na rua Mato Grosso no Bairro de Quitandinha, Petrópolis – RJ, através do Radar de Penetração do Solo (GPR).

Maicon de Souza Marques

**O ESTUDO DA ESTABILIDADE DE ENCOSTAS NA RUA MATO GROSSO NO
BAIRRO DE QUITANDINHA, PETRÓPOLIS – RJ, ATRAVES DO RADAR DE
PENETRAÇÃO NO SOLO (GPR)**

Trabalho de Conclusão de Curso de
Graduação em Geologia do Instituto de
Geociências, Universidade Federal do Rio
de Janeiro – UFRJ, apresentado como
requisito necessário para obtenção do grau
de Bacharel em Geologia.

Orientadora:

Prof^a Dra. Gleide Alencar do Nascimento
Dias

Aprovada em:

Por:

Gleide Alencar do Nascimento Dias (UFRJ)

André de Souza Avelar

Marco Antônio da Silva Braga

Temos o destino que merecemos.
O nosso destino está de acordo com os nossos méritos.
(Albert Einstein)

DEDICATÓRIA

A minha mãe Josefa (in memorian)

E ao meu pai Vivaldo que me indicaram ao norte da vida retilínea.

AGRADECIMENTOS

Muitos ajudaram nesta minha caminhada. Perdão às omissões.

Ao meu pai (Vivaldo Santana Marques) e em especial a minha grande mãe (Josefa Maria de Souza Marques) falecida em 2015, ela não teve a oportunidade de presenciar a concretização da minha formatura, mas penso que de alguma forma torce de onde ela está, para que eu alcance e tenha sucesso nesta minha nova jornada e, quem sabe, a reencontrando-a em uma outra ocasião.

Aos meus irmãos, especialmente meu irmão mais velho Marcelo e a minha irmã Andréa que sempre me acompanharam e me ajudaram nessa e em outras jornadas.

À professora orientadora Gleide Alencar do Nascimento Dias, por ser paciente e por ter me auxiliado até aqui.

À todos os colegas e amigos que fiz durante a graduação.

E finalmente agradeço ao Governador do Universo, pelo dom da vida, pela existência, por todas as coisas e realizações.

RESUMO

MARQUES, Maicon de Souza Marques. **O estudo da estabilidade de encostas na rua Mato Grosso no bairro de Quitandinha, Petrópolis – RJ, através do Radar de Penetração no Solo (GPR).** 2016. xvii, 71p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Geologia) – Departamento de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

O método geofísico Radar de Penetração no Solo (GPR) foi utilizado para a verificação das estruturas de subsuperfície no bairro de Quitandinha, Petrópolis – RJ, na Rua Mato Grosso (22°31'16"S e 43°12'16"W). O GPR estuda as propriedades físicas do solo (permissividade dielétrica) e utiliza ondas eletromagnéticas de altas frequências (ondas de rádio), na faixa de 10 a 2500 MHz. Deslizamentos de terra e enchentes na região serrana do Rio de Janeiro no início de 2011 foram considerados um dos piores desastres da história do Brasil e um dos piores do mundo. Deslizamentos (escorregamentos) são movimentos rápidos de porções de terrenos (solos e rochas) com volumes definidos, deslocando-se sob ação da gravidade para baixo e para fora do talude ou da vertente. O intenso faturamento aliado à tipologia do relevo de vertentes íngremes e declividades elevadas confere à região uma grande incidência de movimentos de massa. Assim confere a região processos de escorregamentos, sendo a área com mais frequência na região sudeste do Brasil. A geologia de Petrópolis caracteriza-se principalmente por migmatitos e granitóides de idade Pré-Cambriana, altamente fraturadas e falhadas. Na área em estudo foram obtidas doze linhas de aquisições de dados GPR ao longo da rua perpendicular a inclinação do morro, as linhas de 1 a 10 foram obtidas em solos mais argilosos com grande quantidade de fragmentos de rochas, e as linhas de 10 a 12 em solo mais arenoso e que já houve caso de escorregamento de solo. O equipamento de GPR foi o SIR 3000 (GSSI) de antena em 200 MHz. Após a aquisição de dados as linhas foram processadas para remoção de ruídos e interpretadas no programa ReflexW. Foi verificada uma camada que separa o solo consolidado e inconsolidado (alta reflexão e estruturas continuas) em aproximadamente de 1,5 m de profundidade em todas as seções radargramas no qual, a camada inconsolidada pode ser novamente deslocada pela presença de grande fluxo de água. A característica hiperbólica interpretada nas seções radargramas podem estar associadas aos corpos rochosos (pedaços de rochas que se deslocaram da parte superior da encosta) ou mesmo da própria consolidação do solo e a não presença de embasamento. Dessa forma buscou-se contribuir no estudo e prevenção de eventuais eventos futuros de deslizamentos, evitando assim perdas materiais e, principalmente, vidas humanas.

Palavras Chaves: deslizamentos, GPR, Petrópolis

Abstract

MARQUES, Maicon de Souza Marques. **The study of slope stability in Mato Grosso street in the neighborhood of Quitandinha, Petrópolis - RJ, through the Soil Penetration Radar (GPR)** 2016. xvii, 71p. Course Completion Work (Bachelor of Geology) - Department of Geology, Institute of Geosciences, Federal University of Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

The Ground penetration Radar (GPR) geophysical method was used to verify subsurface structures in the district of Quitandinha, Petrópolis - RJ, at Rua Mato Grosso (22 ° 31'16 "S and 43 ° 12'16 " W). GPR studies soil physical properties (dielectric permittiveness) and uses electromagnetic waves of high frequencies (radio waves), in the range of 10 to 2500 MHz. Land slips and floods in the mountainous region of Rio de Janeiro at the beginning of 2011 were Considered one of the worst disasters in the history of Brazil and one of the worst in the world. Landslides are rapid movements of portions of land (soils and rocks) with defined volumes, moving under gravity action down and off the slope or slope. The intense fracture allied to the relief typology of steep slopes and Slopes gives the region a high incidence of mass movements. The geology of Petrópolis is characterized by mainly migmatites and granitoids of pre-Cambrian age, highly fractured and failed. In the area under study were obtained twelve lines Of GPR data acquisition along the street perpendicular to the slope of the hill, lines 1 to 10 were obtained in more clayey soils with large amounts of rock fragments, and lines 10 to 12 in more sandy soil and that there were already Case of soil slipping. The GPR equipment was the SIR 3000 (GSSI) antenna at 200 MHz. After data acquisition the lines were processed for noise removal and interpreted in the ReflexW program. It was verified a layer that separates consolidated and unconsolidated soil (high reflection and continuous structures) at approximately 1.5 m depth in all the sections radargrams in which the unconsolidated layer can be displaced again by the presence of large water flow. The hyperbolic characteristic interpreted in the radargrams sections may be associated to the rocky bodies (pieces of rocks that moved from the top of the slope) or even the consolidation of the soil itself and the presence of no basement. In this way it was sought to contribute in the study and prevention of possible future sliding events, thus avoiding material losses and, mainly, human lives.

Keywords: GPR, landslides, Petrópolis.

Lista de figuras

Figura 1 – Depósito de corrida de detritos, bairro da Posse, Teresópolis (RJ) (NERY, 2016).....	18
Figura 2 – Corrida de detritos e lama, Nova Friburgo 2011 (REIS, 2011).....	21
Figura 3 – Esquema de escorregamento translacional (HIGHLAND, 2008).....	21
Figura 4 – Escorregamento translacional que ocorreu em 2001 no Vale do Rio Beaton, British Columbia, Canadá (HIGHLAND, 2008).....	22
Figura 5 – Esquema de escorregamento rotacional (HIGHLAND, 2008).....	22
Figura6 – Fotografia de um escorregamento rotacional ocorrido na Nova Zelândia. A curva verde no centro, à esquerda é a escarpa (área onde o solo rompeu). O solo em pequenas elevações na parte inferior, à direita, é a ponta do deslizamento (linha vermelha). Este fenômeno é chamado escorregamento rotacional pela terra ter se movido da esquerda para a direita de modo curvo. A direção e o eixo da rotação também estão ilustrados. (HIGHLAND, 2008).....	23
Figura 7 – Esquema de queda rochosa (HIGHLAND, 2008).....	23
Figura 8 – Queda rochosa e deslizamento ocorrido em Clear Creek Canyon, Colorado, EUA, em 2005, fechando o trânsito no canyon por várias semanas (HIGHLAND, 2008).....	24
Figura 9 – Brasil, Estado do Rio de Janeiro , Petrópolis.....	26
Figura 10 – Localização da Rua Mato Grosso, Bairro Quitandinha. Imagem retirada do Google Earth™.....	26
Figura 11 – Rua Mato Grosso. Imagem retirada do Google Maps™.....	27

Figura12 – Porção da serra do Mar no Estado do Rio de Janeiro (Serra dos Órgãos: Petrópolis, Teresópolis, Nova Friburgo): mapa geológico simplificado.....	28
Figura 13 – Mapa colorido do relevo com seus respectivos valores de variação com as altitudes (Serra dos Órgãos, RJ). Imagem retirada de “topographic-map.com” e Google™	30
Figura 14 – Indicações sobre cálculo das frações de cada componente do solo, (NEVES <i>et al.</i> 2005).....	32
Figura 15 - Teste do cordão: formação do cordão, até a quebra com 3 mm de diâmetro,e ruptura da bola. Exemplo de uma terra argilosa (Neves <i>et al.</i> 2005).....	33
Figura 16 – Teste da fita: formação do “cigarro” e da fita, com uma terra argilosa (três imagens superiores), tentativa de formação do “cigarro” com uma terra muito arenosa (imagem da esquerda), (NEVES <i>et al.</i> 2005).....	34
Figura 17 – Teste exsudação: diferença entre uma terra argilosa (à esquerda) e uma terra arenosa (à direita), (NEVES <i>et al.</i> 2005).....	35
Figura 18 – Solo intermediário de coloração alaranjada. Esse tipo de solo foi predominantemente encontrado no início das aquisições, nas localidades das primeiras linhas adquiridas.....	36
Figura 19 – Solo avermelhado, localizado na parte medial da rua.....	36
Figura 20 – Solo cinza saprólítico. Este sol foi encontrado na localidade final da rua Mato Grosso. Pode ser descrito com um solo predominantemente arenoso, composto por areia de granulação intermediária. As últimas duas linhas foram adquiridas na localidade deste solo.....	37
Figura 21 – Amostras de solo retiradas na rua Mato Grosso. À esquerda, na parte medial e, à direita, na parte final, onde havia ocorrido deslizamentos anteriormente.....	37

Figura 22 – Mapa topográfico e de variação de altitudes por cores, da localidade da rua Mato Grosso. Imagem retirada de “topographic-map.com” e Google™.....	38
Figura 23 – Vista panorâmica e em três dimensões da localização da rua Mato Grosso. Ao fundo, o bairro de Quitandinha. À direita, pode-se observar uma “mancha” branca, que é uma pedreira da região. Imagens retiradas do Google Earth™.....	39
Figura 24 – Esquema da propagação de onda no GPR, (Dourado, 2001).....	39
Figura 25 – Imagem Ilustrativa do sistema CDP (DOURADO, 2001).....	43
Figura 26 – Ilustração do <i>common offset</i> , (DOURADO,2001).....	44
Figura 27– Equipamento TerraSIRch SIR System-3000.....	45
Figura 28 – Marcação das linhas ao longo da Rua Mato Grosso.....	54
Figura 29 – Linha 1 verificação do afloramento de solo arenoso. Ao lado, fragmentos de rocha de tamanho variado, observados em afloramento de solo próximo.....	54
Figura 30 – Linha 01 não processada (a) e processada (b).....	55
Figura 31 – Linha 2 , obtida ao longo da rua Mato Grosso.....	55
Figura 32 – Linha 02 não processada (a) e processada (b)	56
Figura 33 - Linha 3 obtida ao longo da rua Mato Grosso.....	56
Figura 34 – Linha 3 não processada (a) e processada (b).....	57

Figura 35 – Linha 4 obtida ao longo da rua Mato Grosso.....	57
Figura 36 – Linha 04 não processada (a) e processada (b)	58
Figura 37 – Linha 5, obtida ao longo rua Mato Grosso. Ao lado direito podemos observar blocos, constituintes do solo local.....	58
Figura 38 – Linha 05 não processada (a) e processada (b)	59
Figura 39 –Linha 6, obtida ao longo da rua Mato Grosso. O solo começa e se tornar mais avermelhado e mais argiloso a essa altura.....	59
Figura 40 – Linha 06 não processada (a) e processada (b)	60
Figura 41 – Linha 7, obtida ao longo da rua Mato Grosso.....	61
Figura 42 – Linha 07 não processada (a) e processada (b).....	61
Figura 43 – Linha 8, obtida ao longo da rua Mato Grosso.....	62
Figura 44 – Linha 08 não processada (a) e processada (b).....	62
Figura 45 – Linha 9, obtida ao longo da rua Mato Grosso. Começa a entrar na zona do deslizamento anterior.....	63
Figura 46 – Linha 9 não processada (a) e processada (b)	63
Figura 47 – Linha 10, obtida ao longo da rua Mato Grosso. Apresenta, como é possível ver às margens, um solo de cor acinzentada, com estruturas remanescentes da rocha original (saprolítico). Um solo classificado como jovem, bem arenoso, o que o condiciona mais a eventos de deslizamento.....	64
Figura 48 – Linha 10 não processada (a) e processada (b).....	64

Figura 49 – Linha 11, obtida ao longo da rua Mato Grosso.....	65
Figura 50 – Linha 11 não processada (a) e processada (b)	66
Figura 51 – Linha 12, obtida ao longo da rua Mato Grosso.....	67
Figura 52 – Linha 12 não processada (a) e processada (b).....	67

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Tipos de solo encontrado na região (AVELAR <i>et al.</i> , 2011).....	30
Tabela 2 – Identificação da terra por inspeção táctil-visual, (NEVES <i>et al.</i> , 2005).....	31
Tabela 3 – Avaliação do teste do cordão, (NEVES <i>et al.</i> , 2005).....	33
Tabela 4 – Avaliação do teste da fita (NEVES <i>et al.</i> , 2005).....	34
Tabela 5 – Avaliação do teste do bolo, (NEVES <i>et al.</i> , 2005).....	35

SUMÁRIO

Dedicatória	vii
Agradecimentos	viii
Resumo	ix
Abstract	x
Lista de figuras	xi
Lista de tabelas	xvi
I. INTRODUÇÃO	18
1.1 Deslizamento de terra.....	20
II. OBJETIVOS E ÁREA DE ESTUDO.....	25
2.1 Área de estudo e localização.....	25
2.2 Geologia regional e morfologia.....	27
2.3 Aspectos do relevo e solo.....	29
2.4 Geologia local, estudo de solo e topografia.....	30
III. MÉTODOS	39
3.1 Metodologia GPR.....	39
3.2 Aquisição dos dados.....	42
3.3 Processamento e interpretação de dados.....	45
IV. RESULTADOS.....	53
4.1 Aquisição, processamento e Interpretação das linhas.....	53
V. CONCLUSÃO.....	68
VI. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	69

1. INTRODUÇÃO

Os deslizamentos de encostas e enchentes na região serrana do Rio de Janeiro no início de 2011 foram considerados o pior desastre natural da história do Brasil. (SOUZA *et al.*, 2012; COELHO NETTO *et al.*, 2011; DOURADO *et al.*, 2013). A ONU considerou os deslizamentos como estando entre os 10 piores da história (figura 1).



Figura 1 – Depósito de corrida de detritos, bairro da Posse, Teresópolis (RJ) (NERY, 2016).

A tragédia da região serrana do Rio afetou os municípios de Petrópolis, Nova Friburgo e Teresópolis, deixando um saldo de aproximadamente 900 mortos e cerca de 400 desaparecidos, além de milhares de desabrigados. De acordo com a Defesa Civil, seriam necessários cerca de R\$ 3,4 bilhões em investimentos para recuperar a região afetada pelo desastre.

Desastres dessa natureza são comuns no período do verão, onde ocorrem as chuvas intensas no Brasil, principalmente nas regiões Sul e Sudeste. Estas áreas periodicamente acabam sendo afetadas, ocorrendo enchentes e deslizamentos de terra que acabam por promover destruição e morte. Buscando precaver futuros eventos catastróficos, a integração de geotécnicas aliadas à engenharia tem sido promovida constantemente. Dessa forma tornou-se corriqueiro empregar métodos geofísicos, como o GPR e eletrorresistividade com a finalidade de ampliar ainda

mais o conhecimento acerca das áreas susceptíveis à futuros eventos e também naquelas onde os mesmos já ocorreram.

O sistema GPR (*Ground Penetration Radar* - Radar de Penetração no Solo) nasceu como aplicação ao estudo do interior da Terra partindo dos radares aéreos que se desenvolveram durante a segunda Guerra Mundial para detectar aviões e navios. A técnica de Radar do GPR oferece uma nova forma de investigação de condições geológicas e geotécnicas rasas, diferente da sondagem clássica. O radar produz uma onda eletromagnética de alta frequência (10 – 1000 Hz) que é transmitida ao solo, onde a propagação do sinal depende das propriedades elétricas dos materiais existentes. Mudanças das propriedades elétricas do meio geológico fazem com que parte do sinal transmitido seja refletido. O sinal refletido é detectado por receptor onde é amplificado, digitalizado e armazenado, para ser processado e transformado em registro (radargrama). A maioria dos sistemas podem operar em várias frequências, porém aquelas compreendidas na faixa de 100 MHz a 1,5 GHz são as mais comuns para o uso em estudos geotécnicos.

Os registros de reflexão GPR são interpretados analisando-se suas características determinadas pelo comportamento das micro-ondas e radio frequências ao atravessar o meio. Este comportamento é consequência das características do meio, de tal maneira que alguns autores propõem este método de prospecção para classificar solos (ULRIKSEN, 1982), ou melhor, para caracterizá-los (HÄNNINEN, 1992). Os fenômenos mais importantes nestes estudos de reflexão em descontinuidades eletromagnéticas do subsolo são basicamente quatro: os que afetam a resolução; os que limitam a penetração da energia no meio (atenuação, dispersão); os que determinam o percentual de energia refletida e transmitida em cada um dos contatos e que determinam a velocidade de propagação da onda em cada material. Concluindo, os parâmetros que influem na velocidade da onda são: permissividade relativa do meio, a condutividade elétrica, permeabilidade magnética, são esses que definem um meio a passagem de uma onda eletromagnética. A permissividade dielétrica é uma constante de proporcionalidade entre a intensidade de campo elétrico externo aplicado e o vetor deslocamento. A condutividade elétrica de um meio fornece a resposta de suas cargas livres na presença de um campo elétrico externo. A permeabilidade magnética relaciona a indução magnética, B, com a intensidade do campo magnético H.

Nesse contexto, os parâmetros de permissividade relativa, condutividade e permeabilidade magnética estão entre os parâmetros geofísicos mais úteis na caracterização de materiais e, sendo assim, as variações nesses parâmetros são tipicamente correlacionadas com variações na litologia, saturação de água, condutividade dos fluidos, porosidade e permeabilidade do subsolo (ANDY *et al.*, 2012; BORGES *et al.*, 2003; CHAMBERS *et al.*, 2011; HACK, 2000; JONGMANS *et al.*, 2007 & PERRONE *et al.*, 2004).

1.1 Deslizamento de terra

Geólogos, engenheiros e outros profissionais sempre se apoiam em definições de deslizamentos específicas e com ligeira diferença entre si. Essa diversidade de definições reflete a complexidade da natureza das muitas disciplinas associadas ao estudo desse fenômeno. Deslizamento será um termo genérico, usado para descrever o movimento de descida do solo, de rochas e material orgânico, sob o efeito da gravidade, e também a formação geológica resultante de tal movimento.

Há vários tipos de movimento de massa, segundo CUNHA & GUERRA (2008), dos quais destacamos:

I. Corridas de detritos, lama – São movimentos rápidos onde os materiais se comportam como fluidos altamente viscosos. Elas estão associadas com a grande concentração de água superficial. Na figura abaixo (figura 2) é mostrada uma corrida de detritos e lama, oriundas das chuvas de janeiro de 2011, na região serrana do estado do Rio de Janeiro, que foram responsáveis pelo maior desastre natural da história do Brasil (SOUZA *et al.*, 2012; COELHO NETTO *et al.*, 2011; DOURADO *et al.*, 2013).



Figura 2 – Corrida de detritos e lama, Nova Friburgo 2011 (REIS, 2011).

II. Escorregamentos – Caracterizam-se como movimentos rápidos de curta duração, com planos bem definidos. São feições longas, podendo apresentar uma relação 10:1, comprimento – largura. Podem ser divididos em dois tipos:

II. (a) - Translacionais (planares): Representam a forma mais frequente entre os tipos de movimento de massa, possuindo superfície de ruptura com forma planar, a qual acompanha, de modo geral, descontinuidades mecânicas e/ou hidrológicas existentes no interior do material. Na figura 3 e 4, vemos o exemplo de escorregamento translacional com plano de ruptura bem definido. O peso da vegetação, após ser submetida a fortes chuvas e, conseqüentemente, acúmulo de água, ocasionou no “escorregamento” de todo o pacote solo-vegetação. Estes movimentos ocorrem durante chuvas intensas quando é elevada a poro-pressão em uma superfície de descontinuidade, ou seja, a saturação do pacote de solo acontece de forma rápida.

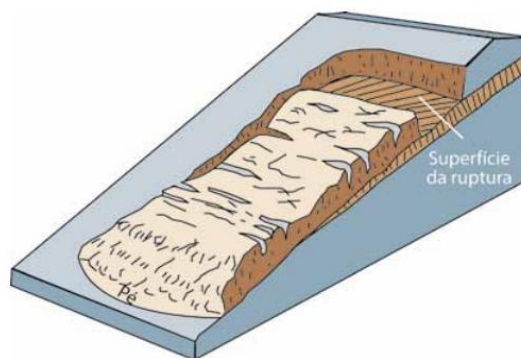


Figura 3 – Esquema de escorregamento translacional (HIGHLAND, 2008).



Figura 4 – Escorregamento translacional que ocorreu em 2001 no Vale do Rio Beaton, British Columbia, Canadá (HIGHLAND, 2008).

II. (b) - Rotacionais (circulares): São compostos por um material que não sofre muitas alterações em sua estrutura, dessa forma podem alcançar grandes proporções, é preciso que exista uma série de fraturas ou fendas, que funcionam como um cisalhamento separando o pacote sedimentar do resto da zona riparia. Esse tipo de movimento de massa atinge grandes proporções, chegando a mais de 20 metros de comprimento, com cicatrizes observáveis a longas distâncias. Na figura 5 temos um esquema em bloco mostrando a superfície de ruptura “curva”, característica desse tipo de escorregamento imagem de um escorregamento rotacional e na figura 6 uma fotografia mostrando uma fotografia de um evento desse tipo.

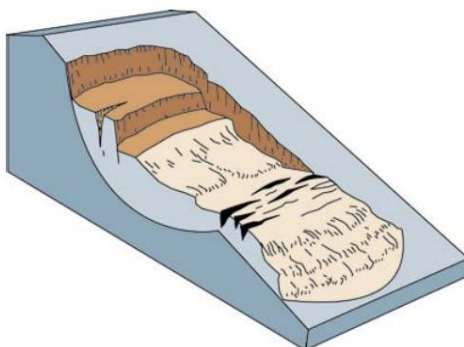


Figura 5 – Esquema de escorregamento rotacional (HIGHLAND, 2008).

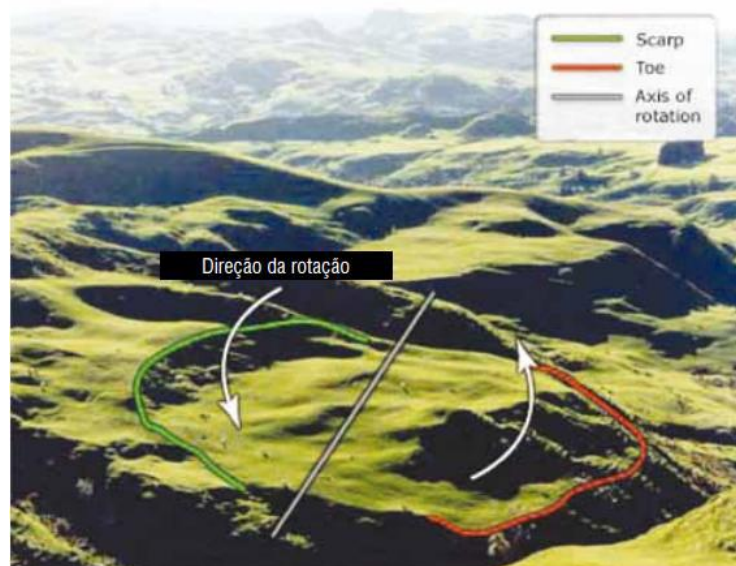


Figura 6 – Escorregamento rotacional ocorrido na Nova Zelândia. A curva verde no centro, à esquerda é a escarpa (área onde o solo rompeu). O solo em pequenas elevações na parte inferior, à direita, é a ponta do deslizamento (linha vermelha). Este fenômeno é chamado escorregamento rotacional pela terra ter se movido da esquerda para a direita de modo curvo. A direção e o eixo da rotação também estão ilustrados (HIGHLAND, 2008).

(III). Quedas rochosas – São movimentos rápidos de blocos e/ou lascas de rocha que caem pela ação da gravidade, sem a presença de uma superfície de deslizamento, na forma de queda livre. Existe ainda uma categoria denominada rastejamento que HANSEN (1984) descreve como sendo definida basicamente pela sua velocidade, devido à natureza lenta do movimento. Na figura 7 é mostrado um esquema desse tipo de escorregamento, e, logo após, na figura 8, uma imagem com blocos caídos.

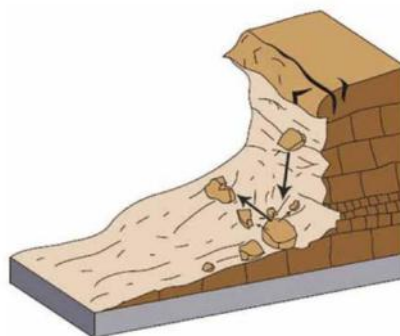


Figura 7 – Esquema de queda rochosa (HIGHLAND, 2008).



Figura 8 – Queda rochosa e deslizamento ocorrido em Clear Creek Canyon, Colorado, EUA, em 2005, fechando o trânsito no canyon por várias semanas. (HIGHLAND, 2008).

Outras classificações de deslizamentos foram propostas, como por exemplo, CRUDEN (1991) & VARNES (1978, 1984) que consideram, principalmente, a atividade (estado, distribuição, estilo) e a descrição do movimento (taxa, teor de água, o tipo de material).

Para entender o número de mortes associada aos escorregamentos é preciso entender que um dos fatores mais importantes no risco de mortes é a velocidade dos escorregamentos, além do volume de terra e população exposta (BRESSANI, 2011). Há muitos casos em que os escorregamentos são lentos (variam de 1 a 5cm a poucos metros por ano), trincam casas, quebram canalizações e derrubam muros mas raramente causam vítimas (como movimentos em Olinda, em Santa Cruz do Sul e em alguns colúvios do RJ). Mas há casos em que os movimentos podem superar em muito a velocidade de pessoas caminhando ou mesmo correndo (BRESSANI, 2011)

Analisar a relação entre deslizamentos de terra e os vários fatores que os causam, não só fornece uma visão sobre a nossa compreensão dos mecanismos desses eventos, mas também pode formar uma base para prever futuros deslizamentos e avaliar o risco de ocorrência. Dada a importância global do problema, muitos estudos têm sido realizados, e vários modelos qualitativos e quantitativos têm sido postuladas (ZHOU *et al.* 2002).

2. OBJETIVOS E ÁREA DE ESTUDO

2.1 Área de estudo e localização

Um dos motivos para a escolha da área (Petrópolis/RJ) foi o impacto provocado pelos deslizamentos ocorridos em janeiro de 2011. As chuvas ocorridas nesse período na região Serrana (Petrópolis, Teresópolis, Nova Friburgo, etc.) do Estado do Rio de Janeiro provocaram enchentes e deslizamentos de enormes proporções, ocasionando a destruição de milhares de residências e um elevado número de óbitos em sua passagem.

O local escolhido no Bairro de Quitandinha, na cidade de Petrópolis, é a Rua Mato Grosso, ela está localizada predominantemente as margens de uma das encostas de uma colina, oriundos da forte ondulação do relevo local, sendo propício a deslizamentos de terra. A Rua Mato Grosso está marcada como zona de risco para deslizamentos pelas autoridades responsáveis locais (Defesa Civil).

COELHO NETTO *et al.* (2011) concluiu que o acúmulo da chuva nos meses que antecederam a catástrofe associado às intensas chuvas com duração de até mais de 24 horas e às condições geológicas e geomorfológicas da região, assim como vegetação e uso da terra, formaram condições propícias para que os milhares de escorregamentos ocorressem.

AVELAR *et al.* (2011), através de trabalhos de campo, registrou a ocorrência de 3562 deslizamentos, observando que rupturas translacionais e *debris flows* (corrida de detritos) foram os mecanismos de ruptura mais encontrados, porém, rupturas circulares e quedas de blocos também foram registradas. Estudos mostraram que as rupturas translacionais foram rasas e em taludes com inclinação superior a 30°.

A área de localização (figuras 9 e 10) para o estudo encontra-se no Bairro Quitandinha na cidade de Petrópolis\ RJ. Para chegar ao local saindo da cidade do Rio de Janeiro, partindo da Avenida Brasil, pegue a saída em direção à Rodovia Washington Luiz (Duque de Caxias), seguindo na Rodovia Washington Luiz, deve-se pegar a saída para a cidade de Petrópolis (figura 11).



Figura 9 – Brasil, Estado do Rio de Janeiro , Petrópolis.



Figura 10 – Localização da Rua Mato Grosso, Bairro Quitandinha. Imagem retirada do Google Earth™.

geológico simplificado da Serra do Mar (Serra dos Órgãos), que compõe, no Estado do Rio de Janeiro, os municípios de Petrópolis, Teresópolis e Nova Friburgo.

A Serra do Mar pertence ao Complexo Cristalino Brasileiro sendo constituída em sua maioria por granitos e gnaisses (figura 12) (SALGADO, 2013). As formas atuais da serra do Mar derivam de vários fatores: diferença de resistência das rochas, falhamento do relevo e sucessivas trocas climáticas.

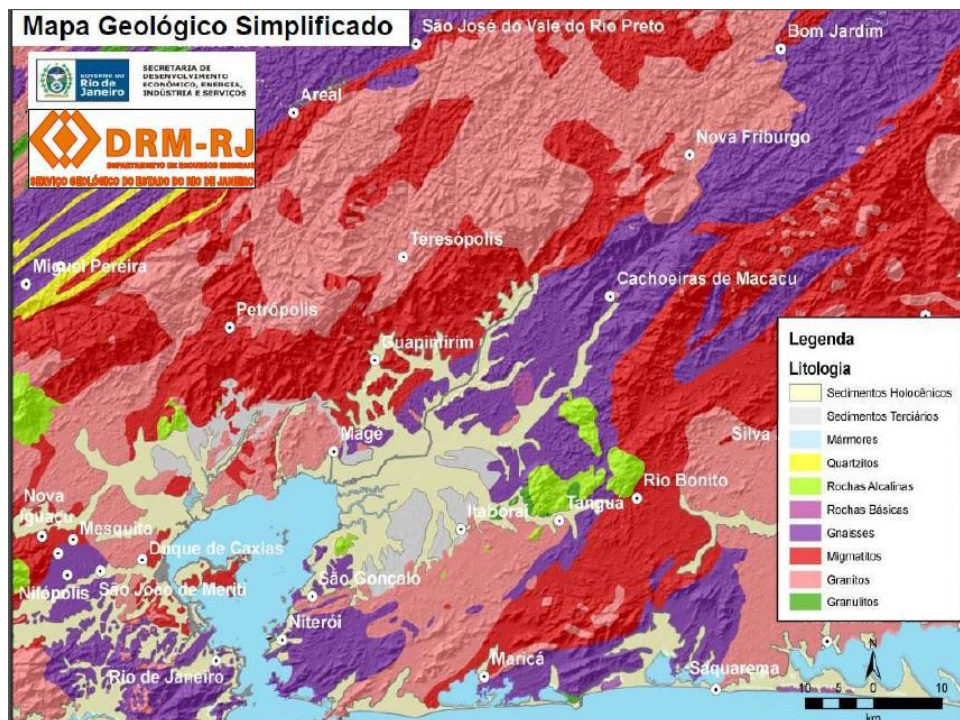


Figura 12 – Porção da serra do Mar no Estado do Rio de Janeiro (Serra dos Órgãos: Petrópolis, Teresópolis, Nova Friburgo): mapa geológico simplificado.

Assim, a história geológica dessa região começa no neoproterozóico, onde se iniciou a instalação do magmatismo γ_1 dos complexos Rio Negro e Trajano de Moraes há 630 Ma, que representam a raiz plutônica de arcos magmáticos gerados durante processo de subducção. Durante a colisão deste arco com uma margem passiva a oeste teria ocorrido duplicação crustal, metamorfismo e geração do magmatismo sin-colisional γ_1-2 e γ_2 (590-570 Ma), representado pelas suítes Rio Turvo, Imbé, Cordeiro e o Complexo Anta. Nas etapas finais da colisão foi gerado o magmatismo calci-alcalino γ_3 (570-560 Ma) da Suíte Serra dos Órgãos. Metamorfismo na fácies anfibolito superior a granulito e deformação plástica cisalhante provocou intensa gnaissificação durante a etapa colisional e seus efeitos térmicos se estenderam até 500 Ma. Zonas de cisalhamento dúcteis-rúpteis transtracionais foram criadas ao final do processo orogênico (500-480 Ma), durante

colapso tectônico, que serviram de conduto para os granitos pós-colisionais γ6 da Suíte Nova Friburgo (TUPINAMBÁ *et al.*, 2012).

Magmatismo básico fissural no Cretáceo gerou o enxame de diques da Serra do Mar, de direção predominante N60E. Zonas de cisalhamento rúpteis de direção NW e N15E, com forte influência na configuração do relevo, estão relacionadas ao tectonismo cenozoico (TUPINAMBÁ *et al.*, 2012).

Na geologia do Município, dados petrográficos e dados geoquímicos de TUPINAMBÁ, 1999, verificam-se que o magmatismo da SSO se caracteriza como uma série expandida, metaluminosa, calci-alcalina de médio a alto-K. Quanto ao posicionamento tectônico do magmatismo, os diagramas discriminam dois ambientes: rochas de médio-K em ambiente de arco continental; rochas de alto-K tardi- a pós-tectônicas.

2.3 Aspectos do relevo e solo

A geomorfologia do município de Petrópolis é caracterizada pela presença do último segmento de montanhas da Serra do Mar, no estado do Rio de Janeiro, que também recebe o nome de Serra dos Órgãos. As montanhas da Serra dos Órgãos apresentam-se como o remanescente da floresta de Mata Atlântica e, pela sua topografia íngreme, se torna muito susceptível à ocorrência de deslizamentos (ALMEIDA, 1998).

No caso específico da região serrana (Petrópolis, Teresópolis, Nova Friburgo), o relevo apresenta muitas encostas com declividades bastante acentuadas e elevada densidade de redes de drenagens perenes que ocupam vales profundos e encaixados, obedecendo a um forte controle estrutural. Vários setores apresentam escarpas imponentes produzidas por falhas geológicas originárias de movimentos epirogenéticos pós-cretáceo.

Petrópolis, assim como as demais localidades da Serra dos Órgãos, apresenta um relevo bastante acidentado, resultando num relevo predominantemente ondulado. Na figura 13 tem-se um mapa do relevo da região da Serra dos Órgãos, com suas respectivas altitudes em cores específicas. Neste mapa, podemos notar a essência do relevo da região, com muitas elevações, muitas ondulações, e com poucas áreas planas, como ditas anteriormente. Desta forma, essa região acaba tendo maior probabilidade e susceptibilidade de deslizamentos de terra.

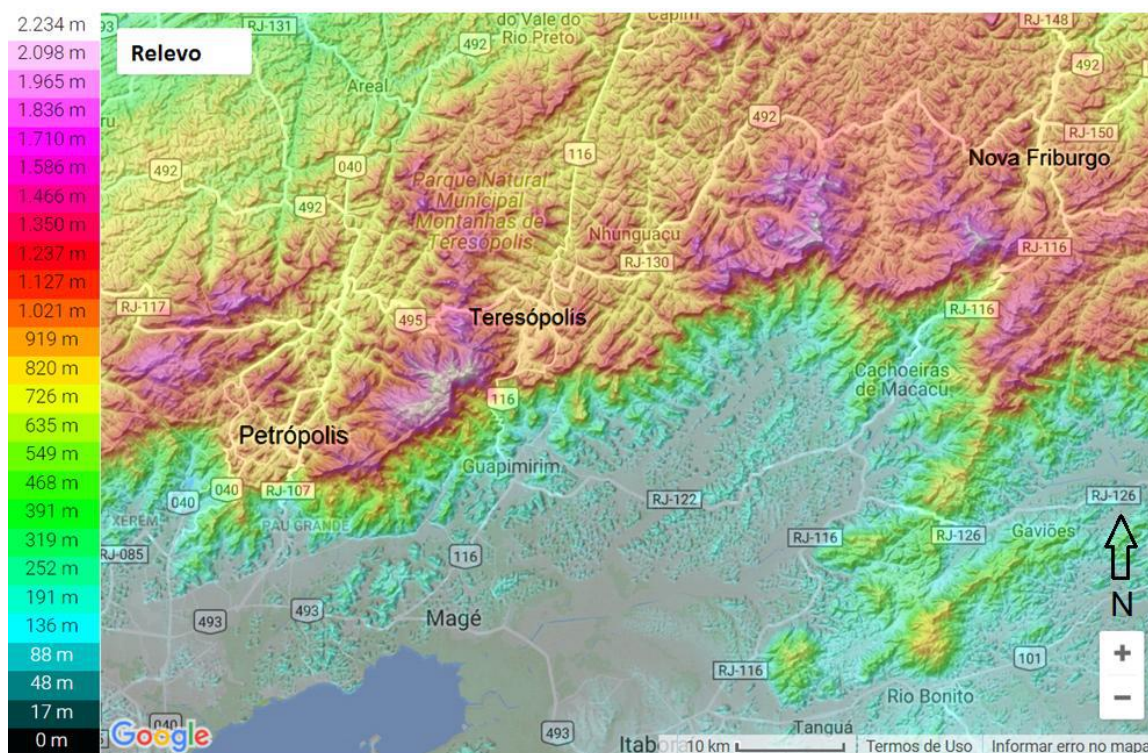


Figura 13 – Mapa colorido do relevo com seus respectivos valores de variação com as altitudes - Serra dos Órgãos, RJ (disponível no site www.topographic-map.com, acessado em janeiro/2017)

2.4 Geologia local, estudo de solo e topografia

O tipo de rocha predominante da região serrana do Rio de Janeiro é o granito. AVELAR *et al* (2011) ao observar os materiais envolvidos nas rupturas translacionais rasas constatou basicamente 4 tipos de solos, conforme apresentado na tabela abaixo.

Tabela 1 – Tipos de solo encontrado na região (AVELAR *et al.* 2011)

Tipo de solo	Descrição
Saprolito cinza	Estágio inicial de intemperismo
Saprolito rosa	Estágio avançado de intemperismo
Colúvio avermelhado	Solo laterizado
Colúvio castanho	Solo localizado em cavidades de vales

O relevo da região apresenta-se fortemente ondulado e com grande presença de encostas, originando, em muitos casos, solos pouco espessos. O solo se constitui de CAMBISSOLOS, seguido de LATOSSOLOS associados aos relevos

montanhosos e fortemente ondulado e ainda de NEOSSOLOS e afloramentos rochosos raros, porém comuns em topografias mais acidentadas (EMBRAPA,1999). Por ser argiloso e a argila reter a água, com a chuva este solo tem seu volume aumentado e fica suscetível a deslizamentos.

O Bairro de Quitandinha apresenta uma geologia com raros afloramentos de rocha sã. Assim o que encontramos foi uma localidade onde predomina a ocorrência de solos. Esses solos apresentam variação na sua formação em relação a granulometria e outros fatores.

A composição do solo no local observado apresenta variação na cor, composição granulométrica, e grau de alteração em relação a rocha sã.

Alguns testes foram feitos em laboratório afim de separar os tipos de solo (tabela 2) encontrados no decorrer da rua Mato Grosso. Desse modo, obteve-se uma sequência de solos com composição que varia no conteúdo de areia, silte e argila. A partir desses dados pôde-se observar que, no decorrer da rua Mato Grosso, a composição do solo apresentou certa variação na sua granulometria (afinamento). Amostras de alguns pontos, comparadas, mostraram algumas diferenças composicionais em relação ao conteúdo de areia (média à fina), silte e argila.

Alguns testes de granulometria foram executados levando a conclusão de um solo majoritariamente arenoso, que apresenta variação no conteúdo de silte e argila. Estes testes são apresentados a seguir:

Tabela 2 – Identificação da terra por inspeção tátil-visual, (NEVES *et al.* 2005).

Classificação	Textura e aparência do solo
Areia	Textura granular. Pode-se visualizar o tamanho dos grãos. Flui livremente se está seca
Solo arenoso	Textura granular porém com suficiente silte e argila para observar sua coesão. Predominam as características da areia
Solo siltoso	Textura fina. Contém uma quantidade moderada de areia fina e uma pequena quantidade de argila. Suja os dedos como talco. Em estado seco, tem uma aparência compacta. Pulveriza com facilidade
Solo argiloso	Textura fina. Quando está seca, fratura-se em torrões resistentes; em estado úmido, é plástico e se agarra aos dedos. É difícil de pulverizar.
Solo orgânico	Textura esponjosa. Olor característico de matéria orgânica que é mais acentuado ao umedecer ou aquecer.

(i) Teste do vidro

Este teste é fundamentado na sedimentação diferenciada dos constituintes da terra (figura14) e consiste em:

- colocar uma porção de terra, seca e destorroada, em um vidro cilíndrico, liso e transparente, até cerca de 1/3 de sua altura;
- adicionar água até 2/3 da altura do vidro, acrescentando uma pitada de sal (o sal age como de flocculante das partículas de terra, porém, se utilizado em demasia pode agir de forma contrária);
- tampar o vidro e agitar vigorosamente a mistura para que haja a dispersão do solo na água;
- deixar em repouso por 1 h e, em seguida, promover nova agitação;
- colocar o vidro em repouso, sobre uma superfície horizontal;

Cada um dos componentes da terra decanta em tempos diferentes formando distintas camadas que se pode visualizar. O pedregulho e a areia decantam primeiro, por serem as partículas mais pesadas, seguido do silte e por último a argila. Se o solo contém matéria orgânica, esta sobrenada na superfície da água.

- quando a água estiver límpida, medir a altura das distintas camadas.

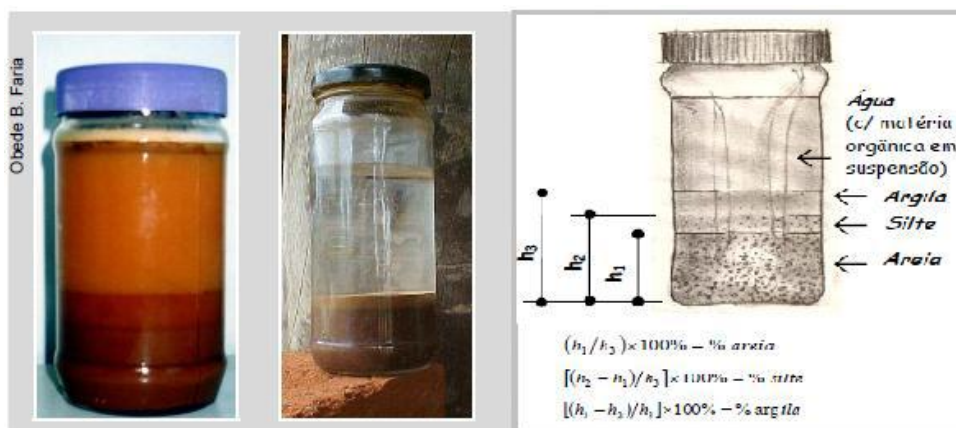


Figura 14 – Indicações sobre cálculo das frações de cada componente do solo, (NEVES *et al.* 2005).

(ii) Teste do cordão

Este teste avalia a resistência da terra em um determinado estado de umidade e a relaciona com o tipo mais provável da terra (figura 15). Ele consiste em:

- tomar uma porção da terra seca e adicionar água até que, rolando sobre uma superfície lisa e plana, seja possível formar um cordão que se quebra com 3 mm de diâmetro;

- formar uma bola da terra nessa umidade e verificar a força necessária para esmagá-la entre o polegar e o indicador;

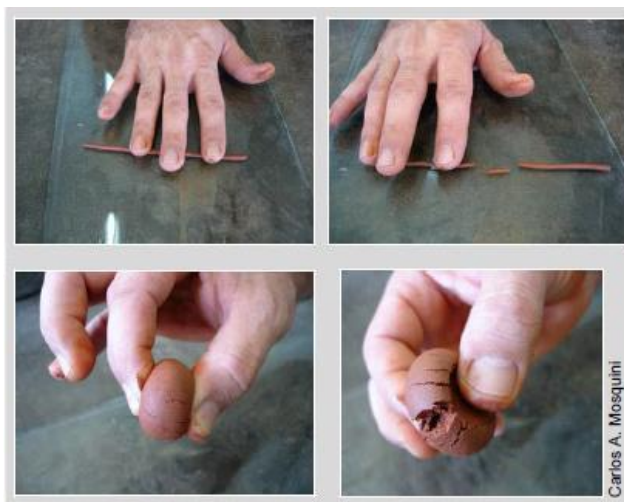


Figura 15 – Teste do cordão: formação do cordão, até a quebra com 3 mm de diâmetro, e ruptura da bola. Exemplo de uma terra argilosa (Neves *et al.* 2005).

A avaliação é feita de acordo com as indicações contidas na tabela 3.

Tabela 3 – Avaliação do teste do cordão, (NEVES *et al.* 2005).

Tipo do cordão	Ruptura da bola	Classificação e interpretação
Duro	Só se pode quebrar a bola com muito esforço ou não se quebra	Muita argila; terra de alta plasticidade
Mole	Pouco resistente. Fissura e esmigalha facilmente	Terra argilo siltosa, arenosa ou areno argilosa; plasticidade média
Frágil	Frágil. Não se pode remoldear a bola devido a sua fragilidade	Bastante silte ou areia e pouca argila; baixa plasticidade
Suave e esponjoso	Esponjosa e fofa. Se é comprimida, volta a esponjar-se	Solo orgânico. Não é apto para nenhum tipo de construção

(iii) Teste da fita

Este teste relaciona a plasticidade com o tipo da terra (figura 16) através do seguinte procedimento:

- tomar uma porção da terra e, com a mesma umidade do teste do cordão, fazer um cilindro do tamanho de um cigarro;
- amassar o cilindro de modo a formar uma fita, com 3 mm a 6 mm de espessura e o maior comprimento possível.

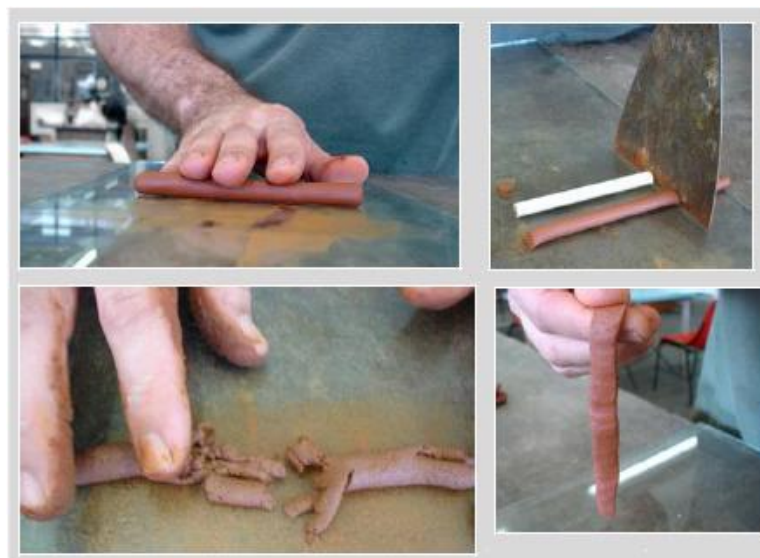


Figura 16 – Teste da fita: formação do “cigarro” e da fita, com uma terra argilosa (três imagens superiores), tentativa de formação do “cigarro” com uma terra muito arenosa (imagem da esquerda), (NEVES *et al.* 2005).

Faz-se a avaliação conforme as indicações contidas na tabela 4.

Tabela 4 – Avaliação do teste da fita (NEVES *et al.* 2005).

Tipo da fita	Comportamento da fita	Classificação e interpretação
Longa	É possível formar uma fita de 25 cm a 30 cm sem dificuldade	Muita argila; terra de alta plasticidade
Curta	É possível formar uma fita de 5 cm a 10 cm com dificuldade	Terra argilo siltosa, arenosa ou areno argilosa; plasticidade média
	Não se faz a fita	Bastante silte ou areia e pouca argila; sem plasticidade

(iv) Teste de exsudação

Avalia a plasticidade da terra em função da sua capacidade de reter água da seguinte forma(figura 17):

- tomar uma porção da terra bastante úmida e colocá-la na palma da mão;
- golpear esta mão com a outra de modo que a água saia para a superfície da amostra, dando-lhe um aspecto liso e brilhante.



Figura 17 – Teste exsudação: diferença entre uma terra argilosa (à esquerda) e uma terra arenosa (à direita), (Neves *et al.* 2005).

A avaliação é feita de acordo com as indicações contidas na tabela 5.

Tabela 5 – Avaliação do teste do bolo, (NEVES *et al.* 2005).

Tipo de reação	Número de golpes	Efeitos na amostra	Classificação e interpretação
Rápida	5 – 10	A água aflora à superfície da amostra; a pressão dos dedos faz a água desaparecer imediatamente e uma pressão mais forte esmigalha o bolo	Pouca plasticidade. Areia fina inorgânica ou silte grosso inorgânico, terra arenosa ou siltosa
Lenta	20 – 30	A água aparece e desaparece lentamente; a pressão dos dedos faz com que o bolo se deforme como uma bola de borracha.	Silte ligeiramente plástico ou silte argiloso
Muito lenta	Mais de 30	Não há mudança notável	Terra de alta plasticidade. Argila

As primeiras linhas foram obtidas em locais onde o solo mostrava-se predominantemente mais arenoso, com coloração intermediária, alaranjada. A medida que subíamos a rua e registrávamos as linhas subseqüentes, o solo apresentava alterações na cor e também na composição, porém essa variação não se apresentou tão bem definida e regular, a ponto de se determinar um padrão de variação composicional satisfatório e preciso. Sendo assim, ao longo da rua Mato Grosso o solo apresentou sim, certa variação granulométrica, porém muito irregular e não uniforme, impossibilitando a determinação precisa de variação do solo (embora o solo apresentasse um relativo afinamento ao decorrer da rua, outras amostras coletadas mostraram composição fora do padrão, o que mostra uma variação granulométrica irregular ao longo da rua). Em alguns outros trechos também foram encontrados mais de uma variação, porém admitimos, após

observações, a predominância de uma maior argilosidade à medida que subíamos a rua. A figura 18 mostra a característica predominante da parte medial da rua Mato Grosso. À medida que fazíamos as aquisições, nos deparamos com este tipo de solo, que era mais avermelhado, com maior teor de argilominerais. Na figura 15 observa-se um solo mais avermelhado, com maiores teores de argila e silte. Este foi o solo encontrado na parte pós medial da rua. Essas determinações foram feitas com auxílio dos testes mostrados anteriormente.



Figura 18 – Solo intermediário de coloração alaranjada. Esse tipo de solo foi predominantemente encontrado no início das aquisições, nas localidades das primeiras linhas adquiridas.



Figura 19 – Solo avermelhado, localizado na parte pós-medial da rua Mato Grosso.



Figura 20 – Solo cinza saprolítico. Este solo foi encontrado na localidade final da rua Mato Grosso, onde havia ocorrido deslizamentos anteriormente. Pode ser descrito com um solo predominantemente arenoso, composto por areia de granulação intermediária. As últimas duas linhas foram adquiridas na localidade deste solo

A figura 21 abaixo mostra dois diferentes solos, os quais foram submetidos a alguns testes. O solo mais vermelho, foi extraído da parte final da rua Mato Grosso e constitui-se de um solo mais argiloso, coluvial e laterizado. A amostra de solo à direita, representa o solo encontrado na parte final da rua (onde havia ocorrido deslizamentos anteriormente) e, submetido a alguns testes, concluiu-se tratar-se de um solo majoritariamente arenoso, com conteúdo menor de argila, se comparado à amostra anterior.

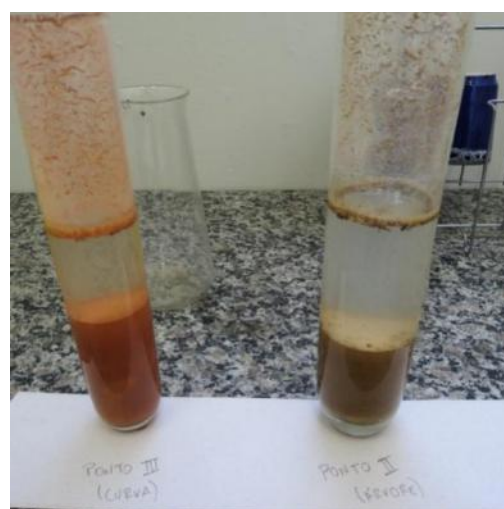


Figura 21 – Amostras de solo retiradas na rua Mato Grosso. À esquerda, na parte medial e, à direita, na parte final, onde havia ocorrido um deslizamento anteriormente.

Levando em consideração esses fatores, as linhas de aquisição foram adquiridas em locais onde a variação do solo se mostrou de certa forma marcante, de modo que as primeiras linhas foram adquiridas em locais onde o solo se mostrava predominantemente alaranjado, de composição mais arenosa. Na parte medial da rua, variações nos afloramentos de solo à beira da rua, mostraram um solo mais avermelhado, podendo ser classificado como laterizado, e com maior presença de argilominerais. No final da rua, na parte onde já havia ocorrido deslizamentos anteriormente, as amostras de solo se mostraram pouco maduras, sendo este solo classificado como saprolítico. Nesta área do deslizamento foi observado também uma maior predominância de vegetação na encosta acima da rua, o que pode ter contribuído para a ocorrência do mesmo.

Quitandinha está situado, em média, a aproximadamente 900 metros do nível do mar. Na figura 22 apresentamos a topografia do local da rua Mato Grosso, com o mapa topográfico também em cores, representando as variações nas altitudes. A rua Mato Grosso está a uma altitude de 1100 metros acima do nível do mar, sendo localizada nas bordas de uma colina, como mostrado na figura 23, uma imagem em três dimensões e panorâmica da localidade da rua.

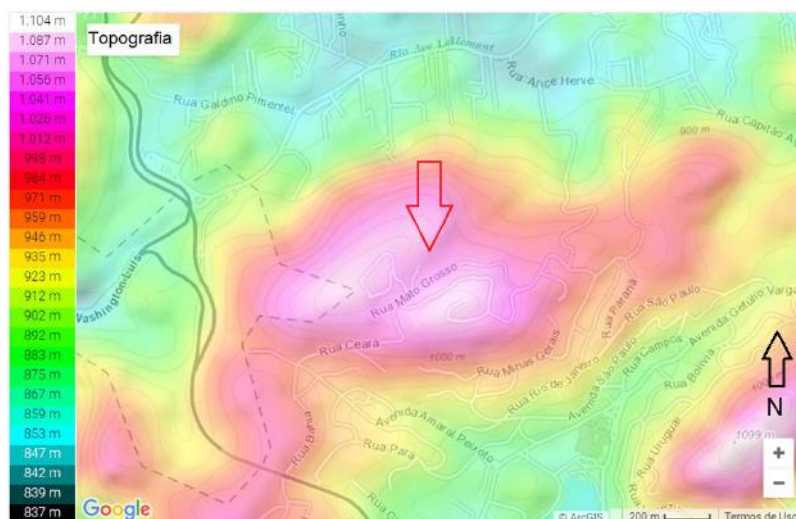


Figura 22 – Mapa topográfico e de variação de altitudes por cores, da localidade da rua Mato Grosso. Imagem retirada de “topographic-map.com” e Google™.

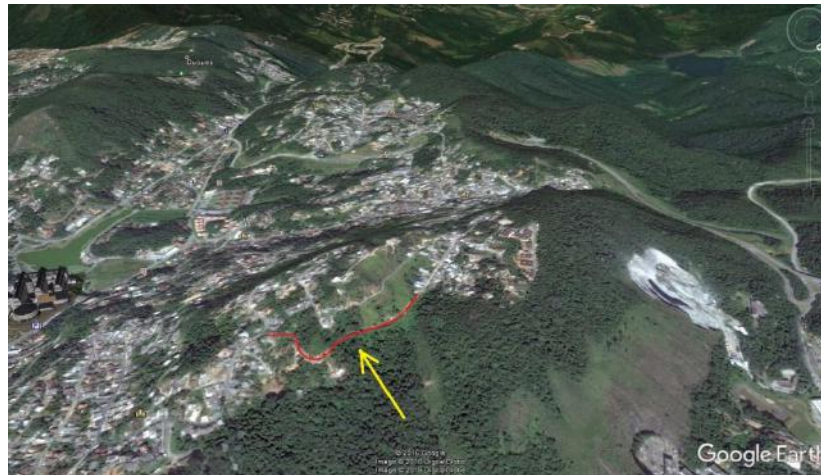


Figura 23 – Vista panorâmica e em três dimensões da localização da rua Mato Grosso. Ao fundo, o bairro de Quitandinha. À direita, pode-se observar uma “mancha” branca, que é uma pedreira da região. Imagens retiradas do Google Earth™.

3. MÉTODO

3.1 Metodologia GPR

O GPR usa como princípio físico a propagação de ondas eletromagnéticas no subsolo para adquirir informações sobre a arquitetura estratigráfica em subsuperfície. O equipamento possui uma unidade transmissora (Tx, figura 24) para emissão de pulso que é captado por outra unidade receptora (Rx, figura 24) após um trânsito pela subsuperfície, com reflexões e refrações nas interfaces que separam materiais com diferentes propriedades elétricas.

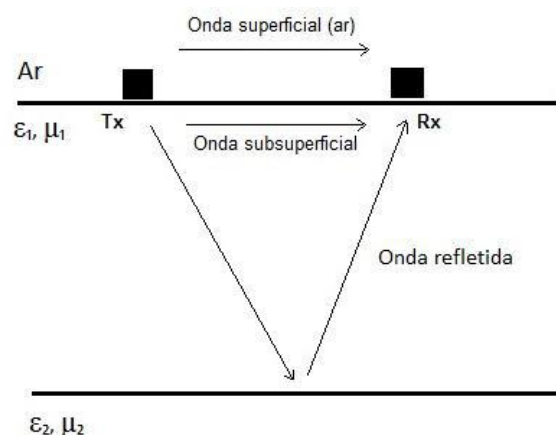


Figura 24 – Esquema da propagação de onda no GPR.

Quando uma partícula eletricamente carregada for perturbada, ela irá se propagar tanto na presença de um meio material quanto no vácuo, originando a onda eletromagnética.

As equações de *Maxwell* descrevem transporte, dissipação, armazenamento e geração da energia eletromagnética nos meios materiais ou no espaço livre. Estas equações relacionam o campo elétrico **E** e o campo magnético **B**, juntamente com suas variações no espaço, representadas pelo operador diferencial ∇ , e no tempo representadas pelo operador diferencial.

Existem os parâmetros constitutivos que se evidenciam nas equações de *Maxwell*, como densidade de corrente **J**, densidade de cargas elétricas **ρ** , assim como duas grandezas inerentes ao meio em que os campos elétricos e magnéticos se propagam: a permissividade dielétrica, **ϵ** , e a permeabilidade magnética, **μ** .

As quatro leis a seguir, descrevem a teoria do campo eletromagnético e constituem a estrutura básica da teoria das interações eletromagnéticas:

As equações de *Maxwell* representam expressões matemáticas de resultados experimentais com aplicações em situações macroscópicas. Cada uma delas representa uma generalização de observações experimentais;

- i) Lei de Gauss para o campo elétrico;
- ii) Lei de Faraday-Henry (um campo magnético variável no tempo produz um campo elétrico);
- iii) Lei de Gauss para o campo magnético;
- iv) Lei de Ampère-*Maxwell* (um campo elétrico variável no tempo produz um campo magnético), onde **E**= campo elétrico (V/m); **B**= campo magnético (T); ϵ = permissividade dielétrica(F/m); μ = permeabilidade magnética (H/m); **J**= densidade de corrente (A/m²) e **ρ** = densidade de cargas elétricas (C/m²).

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{1}{\epsilon_0} \cdot \rho \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (2)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (3)$$

$$\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \vec{j} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (4)$$

O conjunto de equações que compõe as equações de *Maxwell* com aplicações em meios lineares apresenta as seguintes relações: $D = \epsilon E$ (C/m²), densidade de corrente de deslocamento; $J = \sigma E$ (A/m²), densidade de corrente de condução; $H = \mu/B$ (A/m), intensidade do campo magnético.

Considerando as equações de *Maxwell* no vácuo, todas as componentes dos campos eletromagnéticos satisfazem a equação de ondas unidimensional (ALONSO, 1972; REITZ *et al.*, 1982; GRIFFITHS, 1999 e NUSSENZVEIG, 1972; apud, SILVA, 2013) com velocidade de propagação representada por:

$$c = 1/\sqrt{(\epsilon_0 \mu_0)} \quad (5)$$

No caso da propagação de ondas eletromagnéticas em um meio material, e se esse é considerado homogêneo, isotrópico, horizontalmente estratificado e com estratificação (como a Terra), o efeito da polarização e magnetização do meio pela onda eletromagnética implica na substituição das constantes e nas equações de *Maxwell* por ϵ e μ características do material. Dessa maneira, o processo de indução na Terra é descrito por um processo de difusão de campos quase estáticos, cuja única diferença seria a velocidade da onda, dada por:

$$v = 1/\sqrt{\epsilon \mu} \quad (6)$$

O GPR utiliza ondas de rádio num espectro de frequência entre 10 MHz e 1000 MHz, conferindo-lhe a característica de método investigativo de resolução muito alta.

No modo biestático, mais usual, a antena transmissora de radio emite um pulso eletromagnético de alta frequência que se propaga através da subsuperfície. A antena receptora capta o sinal emitido pela transmissora e vindo de diferentes percursos. Neste presente trabalho utilizamos o modo mono-estático para fazer as aquisições. Neste modo, uma única antena é responsável por transmitir e receber o sinal.

Esse processo de radiação das ondas esféricas dá origem às ondas que se propagam diretamente da antena transmissora para a receptora através do solo, do ar, e das ondas que chegam à antena receptora após se refratarem e refletirem nas

interfaces dos meios com diferentes propriedades elétricas. O método se baseia na reflexão de ondas eletromagnéticas nessas interfaces.

3.2 Aquisição dos dados

O sistema de aquisição de dados GPR varia de equipamento para equipamento. Todos os equipamentos possuem uma estrutura básica comum, como a unidade de controle central (UCC – por exemplo um computador), para visualização, armazenamento de dados e *quality control*. A UCC permite um pré-processamento com filtros de frequência e equalização de ganhos.

O equipamento detém uma antena transmissora e uma receptora; quando ambas se encontram na mesma antena, o sistema é monoestático, quando em antenas separadas, o sistema é biestático, exigindo frequências, tamanhos e distâncias das antenas pré-definidos (*common-offset*) para cada objetivo de trabalho.

A aquisição se dá pelos seguintes arranjos:

- Ponto médio comum (*common midpoint* – CMP), angulo aberto de reflexão ou refração (*Wide Angle Reflection and Refraction* - WARR).
- Arranjo de transluminação
- Distancia constante entre as antenas *Common Off-set* – COS ou Reflexão Simples.

CMP e WARR

No modo CMP, as antenas, transmissora e receptora, são deslocadas simetricamente para a esquerda e para a direita a partir de um ponto central. O *offset* inicial é usualmente S1, dependendo da antena a ser utilizada (por exemplo, com a antena de 100 MHz é utilizada para S1 igual a 1 metro) e o espaçamento entre as antenas não pode exceder o máximo da frequência de *Nyquist*, os dados são adquiridos com as antenas espaçadas e aumentando para fora dos centros em passos S1/2.

O método WARR baseia-se em manter a transmissora fixa enquanto a receptora se desloca em relação a transmissora. O CMP é uma variante do WARR que é mais trabalhoso quando se trata de sondagens em perfis. Também é sensível as inclinações e refletores internos, pois a reflexão ocorre aproximadamente no mesmo ponto.

Ambos os arranjos estimam velocidades da propagação de ondas eletromagnéticas do meio, que se vinculam ao tempo de propagação da onda de cada aquisição da antena. Estimamos a velocidade no ar e solo e também da onda refletida nas interfaces de diferença eletromagnéticas, que é importante na migração e determinação na interface de refletores.

Na aquisição deve-se tomar cuidado com a transmissão de ondas diretas pelo ar ou superfície. A visualização dos dados difratados se mostra tal como o sísmico, na forma de parábola.

O método CMP (figura 25) é de grande importância devido a qualidade da informação que ele gera. O fato de conseguir informações de um mesmo ponto (CDP- *common-depth point*) pode auxiliar no processamento do dado, uma vez que ele é adquirido com diferentes distâncias pode-se diferenciar o ruído pela sua diferença de velocidade em relação a onda do GPR.

Tiros[s] e Geofones com Ponto em Profundidade Comum (CDP=CMP)

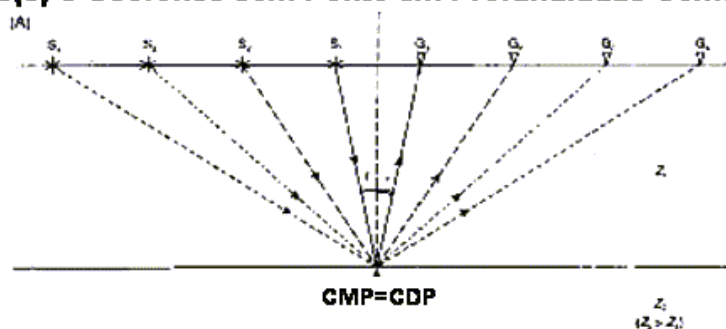


Figura 25 – Imagem Ilustrativa do sistema CDP (Dourado, 2001).

Arranjo de transluminação

É utilizado principalmente para a detecção interna de objetos em locais bastante pequenos. Consiste na modificação do local da receptora enquanto a transmissora permanece parada. É utilizado com as antenas em locais opostos, como no uso para rachaduras em pilastras.

A antena transmissora assume uma posição S1 em relação a antena receptora, a cada ponto de aquisição, um novo ponto deve ser tomado, cuja distância do ponto anterior é S1/2. Esta aquisição (figura 26) é semelhante ao sonar, permitindo a avaliação de diversos parâmetros elétricos dos refletores em subsuperfície.

Este foi o arranjo escolhido para efetuar a aquisição devido a praticidade e agilidade na aquisição dos dados, além das qualidades físicas do método.

Existe também um outro arranjo, que é herdado da sísmica de reflexão, chamado *split-spread*, que é análogo ao sísmico (antenas transmissoras e receptoras). Este é composto por um grupo de receptores, arranjados espacialmente em cabos, obtendo uma distância regular (intervalar).

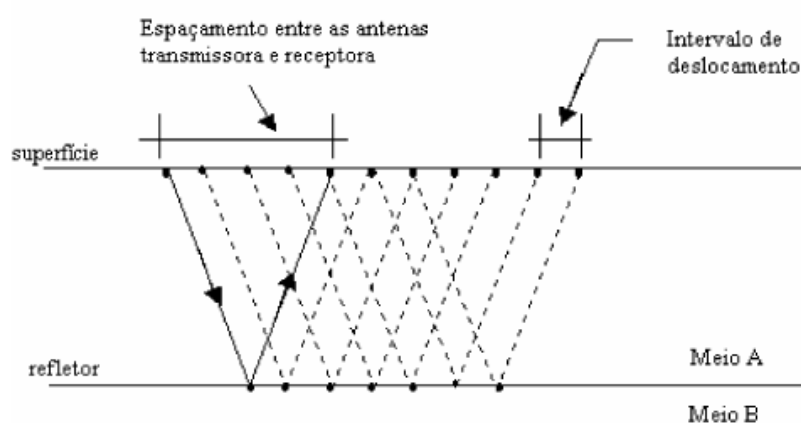


Figura 26 – Ilustração do *common offset*, (Dourado, 2001)

Há inúmeros sistemas de GPR desenvolvidos no mercado mundial. As três maiores empresas fornecedoras do equipamento são: Geophysical Survey Systems Incorporated (GSSI) (Norte-Americana), Senso and Softwares (Canadense) e Mala Geosciences (Sueca). Estas empresas produzem vários modelos de sistemas de radar que podem operar em diversas faixas de frequências. Um sistema de radar consiste basicamente de quatro partes: um gerador de sinal (unidade transmissora), a unidade receptora, a unidade de controle digital e a unidade de visualização (*display*). Para este trabalho foram realizados doze perfis com um equipamento do modelo TerraSIRch SIR (*Subsurface Interface R/adar*) System-3000 fabricado pela Geophysical Survey Systems Incorporated, Inc (GSSI), com antena blindada monoestática de 200 MHz (figura 27).

Muitos levantamentos geofísicos contemporâneos são feitos com um intervalo de amostragem de 0,5 - 0,125 por metro, com linhas espaçadas de 1 a 0,5 m de

distância. Resolução de contraste características menores e inferiores são melhoradas através do aumento da densidade de dados. ERNENWEIN e HARGRAVE (2009, apud SILVA, 2013) mostram que, como o intervalo de amostragem é diminuída 1,5-0,125 m, a capacidade para diferenciar um forno a partir de um pedaço de ferro na superfície é aumentada (usando um magnetômetro). A experiência mostra que 0,5 m é o maior intervalo de tempo adequado, e há uma melhoria considerável em 0,25 m, mas apenas melhorias marginais a 0,125m. Usando um intervalo de amostragem 0,25 m ou menor. O espaçamento selecionado para esse estudo foi de 0,3 m (30cm). O tipo de aquisição foi o *commom-offset* (mono-estática), ou seja, uma única antena trabalha como transmissora e receptora do sinal. O espaçamento em nosso estudo é considerado o fator mais importante devido a percepção do tamanho dos alvos a serem procurados na detecção e reconhecimento de características estruturais.



Figura 27 – Equipamento TerraSIRch SIR System-3000.

3.3 Processamento e interpretação de dados

O processamento básico é feito grande parte das vezes em tempo real. Nesta etapa, avalia-se a qualidade dos dados registrados no intuito de se verificar a presença de ruídos provenientes de qualquer meio durante a aquisição.

EDIÇÃO:

A princípio, ao recebermos os dados devemos converter o dado para um formato interno ao qual iremos trabalhar. Diferentes GPRs utilizam diferentes formatos como é o exemplo do *.rd3 utilizado pela RAMAC, podendo ser reformatados para os formatos internacionais como o SEG-Y.

Na edição nós deletamos os traços ruins, fazemos um merge nas linhas de aquisição que por ventura foram fracionadas, inverter o sentido do perfil e acrescentar informações sobre a topografia. Como o receptor se abre antes mesmo do transmissor enviar o sinal, existe um tempo de registro em que não há sinal e que deve ser corrigido por uma quebra da onda conhecida como “timezero” através de uma correção estática de baixo para cima para o valor de 0ns (*timezero*) dando ao primeiro sinal no traço nos 0ns, ou seja, já a interface ar-terra (COFFEN 1978, apud, SILVA 2013).

A primeira quebra em relação ao 0ns também pode acontecer pelo aumento de temperatura durante a aquisição ou por causa de cabos de fibras ópticas ruins (*time zero jitter*).

GEOMETRIA:

A geometria baseia-se na organização dos dados adquiridos no espaço, onde as informações utilizadas encontram-se nos *Headers*, compostos pelas coordenadas de cada estação, ou melhor, de cada traço registrado e de informações de ganhos por exemplo.

DEWOW:

O *dewow* é um filtro que consiste em remover as mais baixas frequências dos dados. De acordo com a distância entre as antenas do aparelho, a saturação do receptor (grandes amplitudes das ondas de ruído, bem como as propriedades elétricas da terra, fenômeno indutivo) pode induzir um decaimento de baixa frequência “wow” no traço, sofrendo sobreposição nas reflexões de alta frequência.

O *Dewow* é um filtro passa alta, agindo no pico espectral suspendendo as baixas frequências dos dados.

GANHO:

A perda do sinal ao ser absorvido pelo meio propagante, faz com que seja necessário reverter este processo assim como possível. Para isso, deve-se maximizar o sinal de acordo com a profundidade, pois o sinal se perde cada vez mais que se desloca no meio.

Desse modo, a fim de se preservar os pequenos sinais captados e que poderiam acabar por passarem despercebidos usa-se o ganho ou melhor o *time gain*, que corrige a excessiva perda de sinal por parte dos registros mais profundos.

O problema de se colocar um ganho, e retirar a fidelidade da amplitude do sinal, e como diferenciar o ganho para apenas o sinal. Assim de acordo com o modelo geológico adquire-se uma estratégia, como por exemplo se o sinal aparece de forma estratificada horizontal contínua usa-se o ganho AGC (*automatic gain control*) sem considerar a amplitude original. Com o AGC, há um processamento em cada traço para disseminar o ganho apenas em específicas janelas temporais ora acentuando ora amenizando de acordo com a característica do sinal.

Outro tipo de ganho muito comum é o SEC, compensação exponencial esférica, que se baseia de acordo com a expansão esférica do sinal no meio terrestre preservando a qualidade do sinal distribuído sob as mesmas distâncias.

FILTROS ESPACIAIS E TEMPORAIS:

As filtragens espaciais e temporais podem ser utilizadas antes ou depois do ganho, e seu uso é uma das técnicas mais relevantes para o processamento do GPR.

Deve-se aplicar filtragem também nos ruídos de alta frequência. Quanto ao seu espectro de amplitude em função da frequência, esse auxilia na identificação destes ruídos. Utilizam-se filtros passa-banda, passa-baixa, passa-alta, ou outros filtros medianos.

Os parâmetros a serem analisados são: frequência inferior de corte, platô inferior (valor inicial da banda de frequência desejada), platô superior (valor final da banda de frequência desejada) e frequência superior de corte.

A filtragem espacial remove diferentes aspectos ou realça, por exemplo: o filtro passa-baixa realça a continuidade lateral (horizontais) da estratigrafia ao mesmo

tempo que minimiza refletores inclinados, os pontos de difração e ruídos aleatórios. A média móvel (*Move Average*) é a mais comum e também a mais utilizada, segundo (PORSANI 2002, apud, SILVA, 2013).

Já o passa-alta realça refletores localizados e pontuais, bem como os refletores inclinados e horizontais dominantes. O mais comum é a remoção do *background* (*delmean*), (PORSANI 2002, apud, SILVA, 2013).

A filtragem temporal é a filtragem ao longo do tempo do grupo de dados. Diferentes filtros podem ser utilizados tal como os filtros passa-banda, usando a Transformada de Fourier Rápida (FFT). Outros filtros também, como os de convolução, aplicados no tempo linear e não linear.

PROCESSAMENTO AVANÇADO

DECONVOLUÇÃO:

Filtro fundamental na sismica, cujo objetivo é eliminar ou atenuar efeitos de natureza convolucional. É utilizada tanto para eliminar os efeitos de reverberação da lamina d'água como para aprimorar a resolução temporal do sinal através da compressão da onda básica *wavelet* (assinatura da fonte).

A deconvolução objetiva retirar os dados da *wavelet* que não compõem o sinal reflectivo. Para tanto, comprime-se a *wavelet* a fim de retirar o ruído, melhorando a resolução temporal dos dados.

A equação abaixo ilustra a interação da *wavelet* com o filtro:

$$S(t) = Y(t) * w(t)^{-1} * c(t)^{-1}$$

SUBTRAÇÃO DE BACKGROUND:

Utilizado por meio de um filtro passa-alta ou de média móvel, em situações de objetos enterrados em níveis significativos em estratigrafia, ou na exibição de reverberações dos artefatos, permitindo sublocar os sinais mais fracos que são perdidos, tornando-os visíveis.

FILTRO FK:

Permite a aplicação de grande variedade de filtros na aplicação dos dados, tanto no espaço quanto no tempo, ou no domínio da frequência temporal ou espacial.

Possibilita retirar energias indesejadas dos dados como ruídos lineares (tipo *ground-roll*).

A remoção das ondas aéreas e diretas também pode ser feita pelo FK. Corre-se o risco de filtrar, também, sinais que estejam com direção coincidentes com o ruído.

ANALISE DE VELOCIDADES:

Uma das fases mais importantes dos processamentos, importante para converter tempo em profundidade. Este perfil de velocidades pode possuir variações vertical e até lateral de acordo com a anisotropia da litologia.

Existem várias metodologias para estimar este parâmetro, tais como:

- I. através de dados tabelados: a utilização de valores tabelados não é a mais adequada devido ao desconhecimento, a priori do sítio investigado, as variações para uma mesma litologia e heterogeneidades sempre existem (GANDOLFO, 2003, apud SILVA, 2013).
- II. entrada de registros de velocidade de fontes externas: através de dados de poços ou de fáceis de afloramentos.
- III. conhecimento da profundidade do refletor ou alvo: normalmente não se tem informação disponível com relação à profundidade de determinado alvo e correlação direta deste com um refletor ou feição observável no registro.
- IV. ajuste de funções de hipérbole em eventos de uma seção: Uma forma de determinar a velocidade é através forma da hipérboles de difração. Entretanto tem-se um fator crucial, a não existência de hipérboles nas seções radargramas. O ajuste de hipérbole é feito a partir da geometria de hipérboles de difração presente na seção radargrama. Serão

extraídos os parâmetros de velocidade, profundidade e diâmetro. Esta é a velocidade RMS ao ápice da hipérbole.

Verificado o valor da hipérbole em por exemplo de 0,079 m/ns esta velocidade é consistente com a difração de um arenito saturado. A migração então é feita nesta velocidade evidenciando uma imagem da fratura que dá a certa difração. Para eventos de ondas diretas a velocidade média de 0.26 m/ns é resultante de objetos espalhados em superfície.

V. ensaios CMP/WARR:

Estes são os métodos mais utilizados e que proporciona uma medida confiável (uma vez que é determinada “*in situ*”). Para a execução destas aquisições é necessário a antena biestática.

Uma das formas para se obter os valores de velocidade é através dos radargramas com feições hiperbólicas que são associadas a pulsos refletidos em tempos progressivamente menores, ao longo do perfil, até uma posição onde obtêm valores crescentes. Analisando essas hipérboles de tempo por separação entre as antenas obtidas com arranjo do tipo CMP/WARR, é possível estimar a velocidade da onda de radar no subsolo.

CORREÇÃO DE NMO:

Nem sempre as hipérboles no radargrama se ajustam aos refletores horizontais. As velocidades irregulares distorcem a imagem de forma estática ou dinâmica. Para se melhorar o QC do *stack*, as correções são feitas no CMP.

EMPILHAMENTO (*STACKING*):

O *stack* permite a organização dos traços de uma seção, imageando a mesma. Necessita primeiramente a aplicação da Geometria para isso. Os traços são tirados a partir dos resultados dos filtros de NMO, para melhor qualidade. Os vários CMPs de um mesmo traço se unem afim de aumentar o sinal ruído e o “representante final” é incorporado pelo *stack*, junto a outros milhares de traços provindos do CMP e organizados com os dados da Geometria. (YILMAZ, 1991, apud, SILVA, 2013).

INTERPOLAÇÃO:

A interpolação se faz como em outras áreas da ciência, trata-se de inserir um novo dado a partir de dois dados adjacentes. O Objetivo é aumentar o tamanho do refletor e auxiliar a remover o “alias espacial” que pode prejudicar o filtro de migração.

MIGRAÇÃO:

O filtro migração baseia-se na realocação dos alvos aos quais tiveram suas posições distorcidas a partir de refletores inclinados, tornando os dados mais realistas a geometria original. Assim os sinais se mostram mais contínuos e as dobras (sinformais) bruscas são suavizadas. O efeito sorriso que muitas vezes ocorre após a migração ocorre devido as amplitudes trabalhadas são anômalas.

A boa interpretação dos dados requer um bom conhecimento dos modelos geológicos, saber os objetivos do levantamento e a qualidade dos dados adquiridos, porém, é fundamental que haja baixa relação sinal/ruído.

No transmissor da antena é gerado os pulsos de voltagem, curtos e altos, dentro da antena, o qual irradia com uma frequência específica. Este mono pulso gera um comprimento de onda longo e com amplitude que é transmitido e, após um intervalo de tempo, recebido como sinal na unidade de controle. A antena receptora leva o sinal que é digitalmente representado e registrado como 16 bits.

O radar de penetração do solo, GPR (Georadar), que se baseia em ondas eletromagnéticas de alta frequência, vem sendo utilizado para sondagem de alta definição em subsuperfície, graças a aquisição dos dados de forma rápida.

As ondas do GPR, ao incidir na interface que separa os contrastes das propriedades eletromagnéticas, seja a permissividade dielétrica, a condutividade elétrica ou a permeabilidade magnética, é em parte refletida para o receptor do aparelho onde é registrado.

Atualmente o uso do radar nas Geociências, pode ser utilizado de diversas formas, seja em poços ou aéreos. No caso usaremos a aquisição tradicional em superfície. A difusão do método é dada pela investigação da espessura do solo,

profundidade e heterogeneidade de embasamentos para identificação de corpos de minérios ou na sedimentologia para depósitos ou qualificação de reservatórios ou outros diversos fins.

Na estratigrafia criou-se o uso da expressão “fácies de radar”, onde as feições estruturais e texturais limitam as divisões de cada facie definida no radargrama. Parâmetros como amplitude, continuidade e configuração da reflexão, constituem elementos da facie. Outros parâmetros secundários também coexistem e o conceito “facie de radar” foi primeiramente empregado na analogia de fácies sísmicas.

A imagem do radar é influenciada pela saturação de água e pela arquitetura sedimentar, podendo, assim, definir a radar-estratigrafia, que é o estudo das características do registro geológico e seus ambientes deposicionais a partir de radargramas. Desta forma interpretamos a radarestratigrafia, reconhecendo padrões de reflexão e correlaciona-los com ambientes sedimentares.

Há várias vantagens na utilização do método GPR, por exemplo, a revisão *on site* dos resultados de um levantamento (QC), o uso urbano (com antenas blindadas), não agride o seu meio de aplicação, dentre outros.

Segundo ELMORE e HEALD (1969), os fenômenos eletromagnéticos do aparelho, são produzidos e detectados por cargas elétricas dividindo-se em: fonte de carga (gerador do campo eletromagnético) e detector de carga. A relação entre a carga elétrica e o campo magnético se dá pelo movimento de um deles, que provoca a existência do outro perpendicularmente ao movimento.

As equações de *Maxwell* são diferenciais parciais que regem efeitos eletromagnéticos descrevendo o transporte, dissipação, armazenamento e geração da energia eletromagnética nos meios materiais ou no espaço livre. Estas equações relacionam o campo elétrico e o campo magnético, juntamente com suas variações no espaço livre, seja no domínio da frequência ou do tempo.

Quando um pulso é gerado, é verificado as duas reflexões fortes no início do perfil relacionadas às ondas diretas no ar e na terra, e também é necessário identificar as origens das reflexões que possam representar a geologia ou interferências (PORSANI, 2002, apud, SILVA 2013).

Existem 3 classes de feições identificáveis nos perfis:

- a) Refletores horizontais contínuos.
- b) Refletores de objetos 2D e 3D.
- c) Hipérboles de difrações de descontinuidades laterais.

Na leitura dos dados no radargrama, a presença de hipérboles são provenientes de objetos que, quando são de subsuperfície, produzem hipérboles fechadas, enquanto as hipérboles abertas são frutos de objetos em superfície. Assim, o interprete deve se atentar durante a aquisição quanto a fontes de interferências que afetariam a qualidade do mesmo.

Exemplos:

Objetos de superfície: casas, cercas elétricas, edifícios, etc.

Objetos aéreos: torres de alta tensão, postes de iluminação, etc.

Objetos transmissores de sinais eletromagnéticos: estações de rádio, aeroportos, etc.

A vantagem do método eletromagnético é ser livre de ruídos (poucos), aumentando-se nos centros urbanos.

No que diz a respeito da ressonância da antena, a primeira interface ar/meio para uma *wavelet* de fase zero, é marcada por polaridade reversa com a velocidade decrescendo de acordo com a profundidade, diferente do método sísmico.

4. RESULTADOS

4.1 Aquisição, processamento e interpretação das linhas

A aquisição de dados ao longo da Rua Mato Grosso se desencadeou a partir da obtenção de um perfil de reflexão com afastamento constante ou “common offset”. O perfil de reflexão se constrói a partir da emissão de pulsos eletromagnéticos sucessíveis, neste trabalho, a aquisição dos dados foi longitudinalmente à rua, perpendicular a encosta, os dados foram obtidos a uma distância constante de 0,3m (30cm) em uma linha, reta, de maior tamanho possível. As linhas adquiridas tiveram um comprimento máximo de aproximadamente 50m, sendo obtidas pela movimentação de arrasto da antena de GPR. Ao nos depararmos com uma curva ou colina, por exemplo, a linha tinha que ser registrada e finalizada sendo os dados registrados no equipamento. As linhas foram obtidas na rua Mato Grosso, onde há uma variação de solo de argiloso a arenoso. Foram obtidas um total de 12 linhas com o as antenas de 200 MHz (figura 28), o esquema dos traçados no terreno.



Figura 28 – Marcação das linhas ao longo da Rua Mato Grosso. Imagem do Google Earth

O processamento foi realizado no laboratório de física da Terra, na faculdade de Geologia da UFRJ (Universidade Federal do Rio de Janeiro) utilizando o software de processamento REFLEX - Interpex. Composto das etapas: ajuste tempo-zero (*timezero*), *dewow*, *remove background*, filtro passa-banda (*band-pass filter*), ganho (*AGC Gain*), migração 2d (*2dmigration*). A interpretação consistiu após o processamento dos dados com a utilização do software de REFLEX - Interpex.

A linha 01 possui 40 metros de extensão com direção SW-NE, obtida perpendicular a encosta. Superficialmente na área de aquisição o solo é arenoso com fragmentos rochosos que tem seus tamanhos variando de alguns centímetros a metros (figura 29). Na seção radargrama (figura 30) é verificada uma interface em torno de 1 a 2 metros de profundidade o qual caracteriza o contato entre friável e solo compactado. No solo compactado é verificada a forma hiperbólica que caracteriza fragmentos rochosos. Na seção radargrama não foi verificada a presença de embasamento e próxima a rua acima e abaixo de onde foram realizadas as aquisições de dados o terreno apresenta boa declividade (aproximadamente 30° de declividade).



Figura 29 – Linha 01, verificação do afloramento de solo arenoso. Ao lado, fragmentos de rocha de tamanho variado, observados em afloramento de solo próximo.

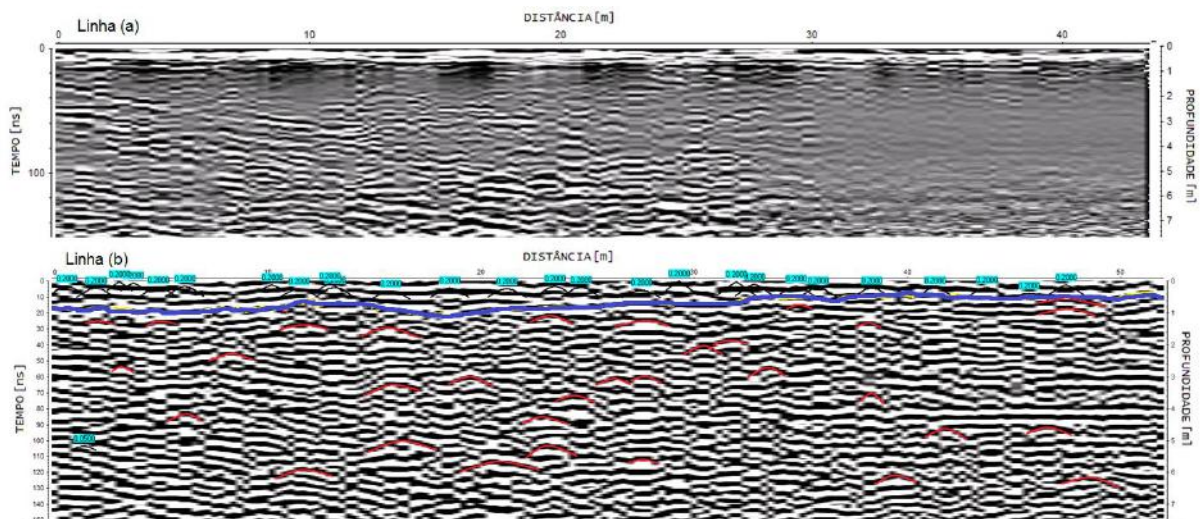


Figura 30 – Linha 01 não processada (a) e processada (b).

A linha 02 também possui aproximadamente 40 metros de extensão com direção SW-NE, obtida perpendicular a encosta. Superficialmente na área de aquisição, o solo apresenta-se areno-argiloso com fragmentos rochosos com variações de cm a metros (figura 31). Na seção radargrama (figura 32) é verificada uma interface em torno de 1 a 2 metros de profundidade a qual caracteriza o contato entre friável e solo compactado. No solo compactado é verificado a forma hiperbólica que caracteriza fragmentos rochosos. Na seção radargrama não foi verificado a presença de embasamento e próxima a rua acima e abaixo de onde foram realizadas as aquisições de dados o terreno apresenta alta e baixa declividade (aproximadamente 45° e 30° de declividade respectivamente).



Figura 31 – Linha 02, obtida ao longo da rua Mato Grosso.

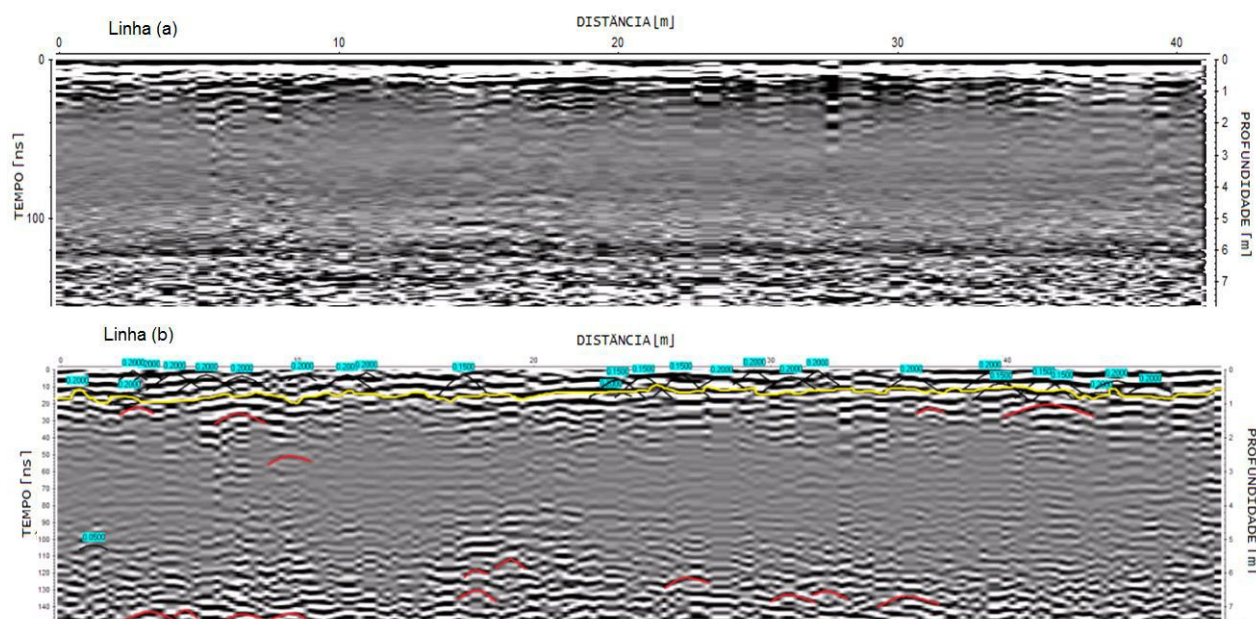


Figura 32 – Linha 02 não processada (a) e processada (b)

A linha 03 também possui aproximadamente 40 metros de extensão com direção W-E, obtida perpendicular a encosta. Superficialmente na área de aquisição, o solo apresenta-se areno-argiloso com fragmentos rochosos com variações de cm a metros (figura 33). A partir desse ponto, o solo passa a apresentar-se mais avermelhado. Na seção radargrama (figura 34) é verificada uma interface em torno de 1 a 2 metros de profundidade o qual caracteriza o contato entre solo friável e solo compactado. No solo compactado é verificado a forma hiperbólica que caracteriza fragmentos rochosos e concreções formadas pelo solo mais compactado em determinados locais. Na seção radargrama não foi verificado a presença de embasamento e próxima a rua acima e abaixo de onde foram realizadas as aquisições de dados o terreno apresenta baixa e alta declividade (aproximadamente 30° e 50° respectivamente), sendo possível verificar como mostrado na figura 33 (a direita), pequenas linhas de drenagem.



Figura 33 – Linha 03, obtida ao longo da rua Mato Grosso.

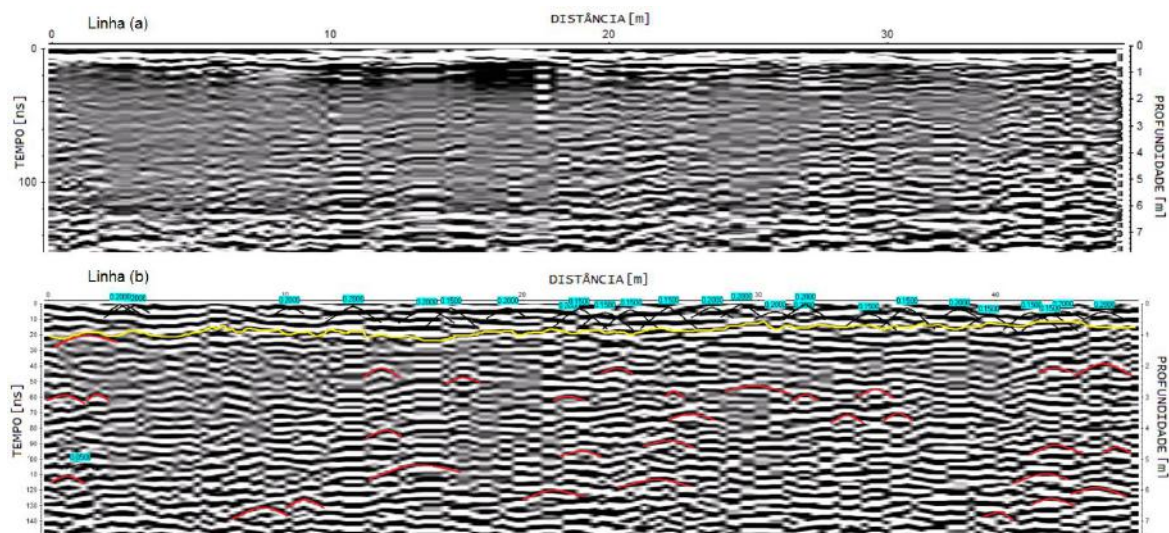


Figura 34 – Linha 03 não processada (a) e processada (b).

A linha 04 também possui aproximadamente 20 metros de extensão com direção W-E, obtida perpendicular a encosta. Superficialmente na área de aquisição, o solo apresenta-se areno-argiloso com fragmentos rochosos com variações de cm a metros (figura 35). A partir desse ponto, o solo passa a apresentar-se mais avermelhado. Na seção radargrama (figura 36) é verificada uma interface em torno de 1 a 2 metros de profundidade o qual caracteriza o contato entre solo friável e solo compactado. No solo compactado é verificada formas hiperbólicas que caracteriza fragmentos rochosos. Na seção radargrama não foi verificado a presença de embasamento e próxima a rua acima e abaixo de onde foram realizadas as aquisições de dados o terreno apresenta alta declividade (aproximadamente 50° de declividade). Na seção radargrama não foi verificado a presença de embasamento e próxima a rua acima e abaixo de onde foram realizadas as aquisições de dados o terreno apresenta baixa e alta declividade (aproximadamente 30° e 50°). Sendo verificada em superfície a presença de fragmentos rochosos. Abaixo da linha de aquisição pode ser verificada a presença de casas sem a área de proteção de encosta.



Figura 35 – Linha 04 obtida ao longo da rua Mato Grosso. A seta em vermelho destaca a presença de fragmentos de rochas.

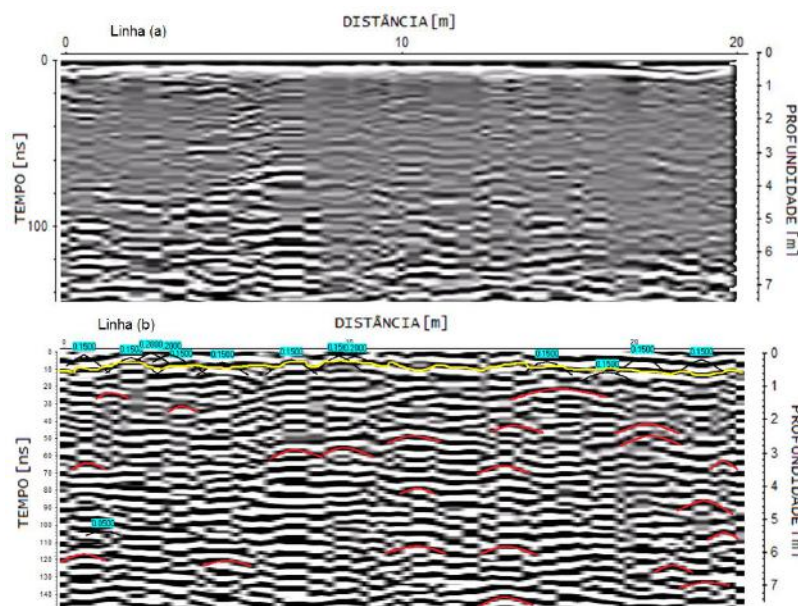


Figura 36– Linha 04 não processada (a) e processada (b).

A linha 05 também possui aproximadamente 40 metros de extensão com direção W-E, obtida perpendicular a encosta. Superficialmente na área de aquisição, o solo apresenta-se areno-argiloso com fragmentos rochosos com variações de cm a metros (figura 37). A partir desse ponto, o solo passa a apresentar-se mais avermelhado. Na seção radargrama (figura 38) é verificada uma interface em torno de 1 a 2 metros de profundidade o qual caracteriza o contato entre solo friável e solo compactado. No solo compactado é verificada a presença de formas hiperbólicas que caracterizam fragmentos rochosos. Na seção radargrama não foi verificado a presença de embasamento e próxima a rua, acima e abaixo de onde foram realizadas as aquisições de dados, o terreno apresenta alta declividade (aproximadamente 60°). Foi verificada em superfície a presença de fragmentos rochosos.



Figura 37 – Linha 05, obtida ao longo rua Mato Grosso. Ao lado direito podemos observar blocos, constituintes do solo local. Fragmentos de rocha indicado em seta em vermelho.

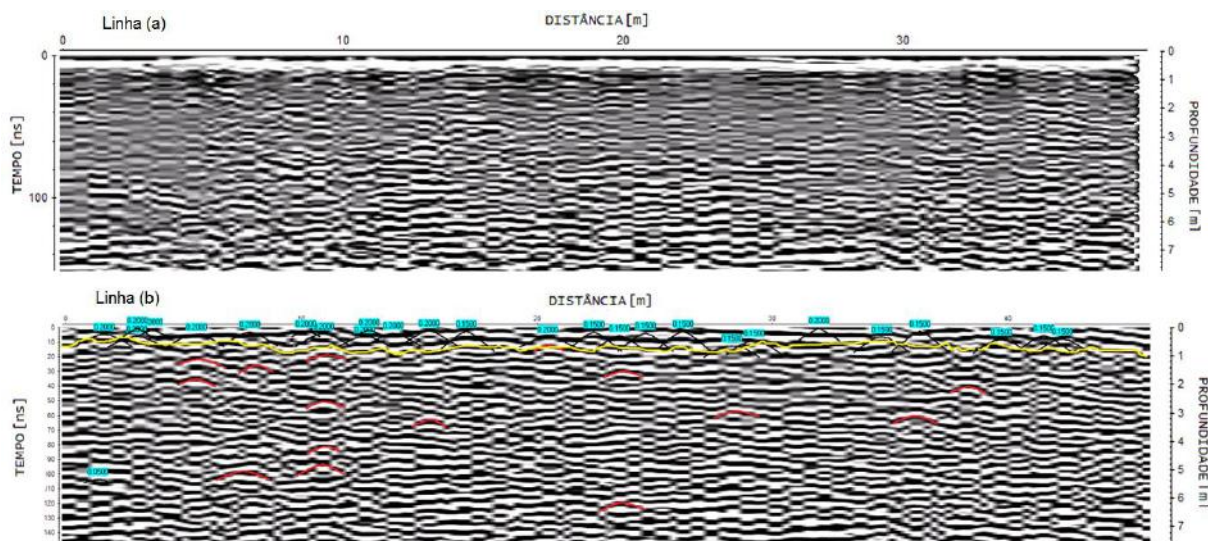


Figura 38 – Linha 05 não processada (a) e processada (b).

As linhas 06 e 07 também possuem aproximadamente 15 metros de extensão com direção W-E, obtida perpendicular a encosta. Superficialmente na área de aquisição, o solo apresenta-se areno-argiloso com fragmentos rochosos com variações de cm a metros (figura 39). A partir desse ponto, o solo passa a apresentar-se mais avermelhado. Na seção radargrama (figura 40) é verificada uma interface em torno de 1 a 2 metros de profundidade o qual caracteriza o contato entre solo friável e solo compactado. No solo compactado é verificada a presença de formas hiperbólicas que caracterizam fragmentos rochosos. Na seção radargrama não foi verificado a presença de embasamento e próxima a rua acima e abaixo de onde foram realizadas as aquisições de dados o terreno apresenta baixa declividade (aproximadamente 30^0). Sendo verificada em superfície a presença de fragmentos rochosos. Abaixo da linha de aquisição pode ser verificada a presença de casas.



Figura 39 – Linha06, obtida ao longo da rua Mato Grosso. O solo começa e se tornar mais avermelhado e mais argiloso a essa altura.

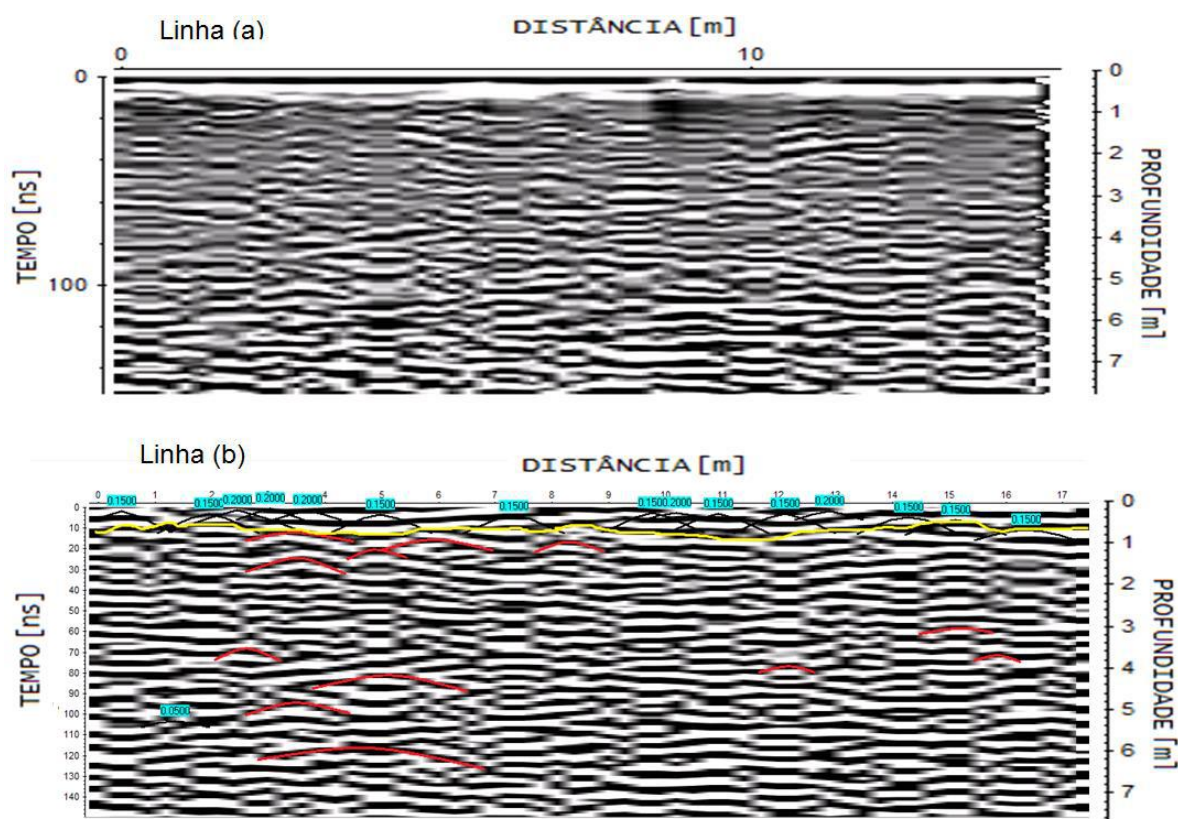


Figura 40 – Linha 06 não processada (a) e processada (b).

A linha 07 também possui aproximadamente 15 metros de extensão com direção NW-SE, obtida perpendicular a encosta. Superficialmente na área de aquisição, o solo apresenta-se areno-argiloso com fragmentos rochosos com variações de cm a metros (figura 41). A partir desse ponto, o solo passa a apresentar-se mais avermelhado. Na seção radargrama (figura 42) é verificada uma interface em torno de 1 a 2 metros de profundidade o qual caracteriza o contato entre solo friável e solo compactado. No solo compactado é verificada a presença formas hiperbólicas que caracterizam fragmentos rochosos ou concreções. Na seção radargrama não foi verificado a presença de embasamento e próxima a rua acima e abaixo de onde foram realizadas as aquisições de dados o terreno apresenta baixa e alta declividade (aproximadamente 30° e 50°). Foi verificada em superfície a presença de fragmentos rochosos. Abaixo da linha de aquisição pode ser verificada a presença de casas sem a área proteção de encosta.



Figura 41- Linha 07, obtida ao longo da rua Mato Grosso.

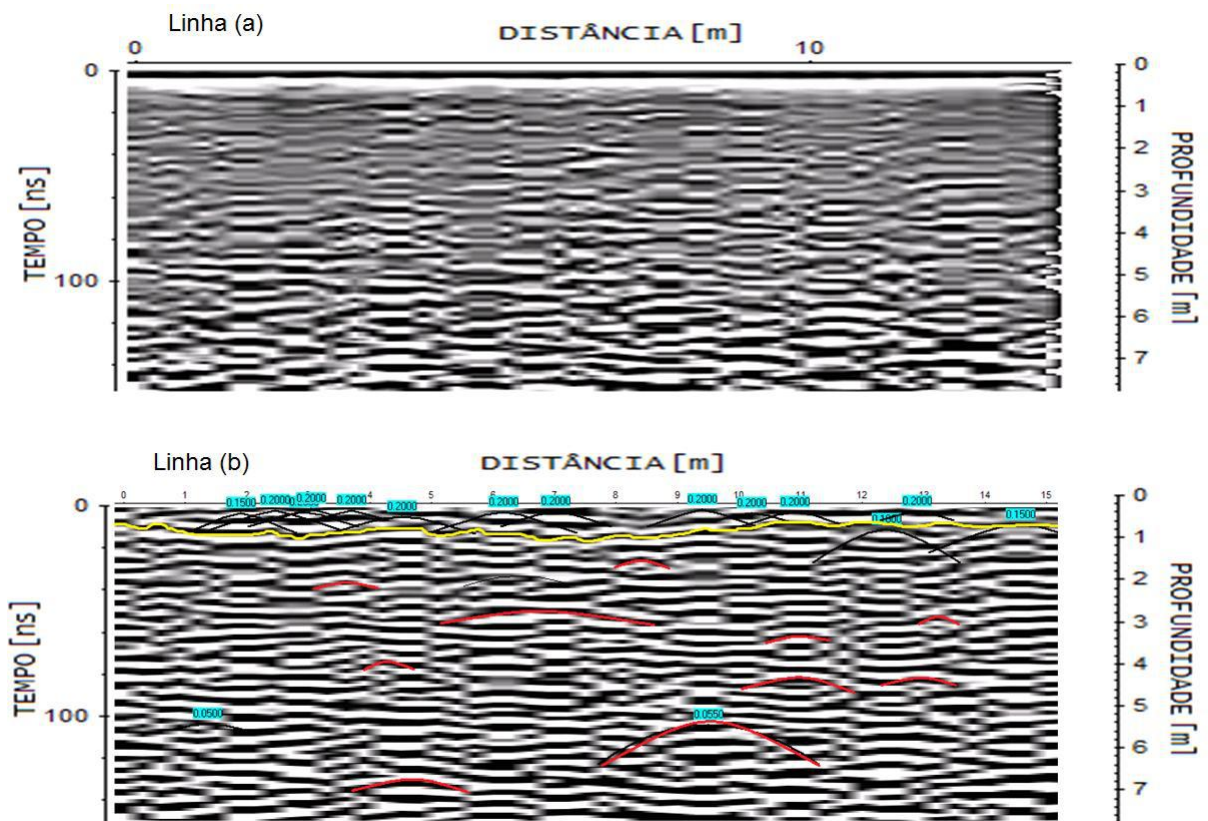


Figura 42 – Linha 07 não processada (a) e processada (b).

A linha 08 também possui aproximadamente 20 metros de extensão com direção NW-SE, obtida perpendicular a encosta. Superficialmente na área de aquisição, o solo apresenta-se areno-argiloso com fragmentos rochosos com variações de cm a metros (figura 43). A partir desse ponto, o solo começa a ter as mesmas características do solo dos pontos 10, 11, e 12, onde já havia ocorrido um evento de deslizamento. Na seção radargrama (figura 44) é verificada uma interface em torno de 1 a 2 metros de profundidade o qual caracteriza o contato entre solo friável e solo compactado. No solo compactado é verificada a presença de formas hiperbólicas que caracterizam fragmentos rochosos. Na seção radargrama não foi

verificada a presença de embasamento e, próxima a rua acima e abaixo de onde foram realizadas as aquisições de dados, o terreno apresenta alta e baixa declividade (aproximadamente 50° e 20°). Foi verificada em superfície a presença de fragmentos rochosos. Abaixo da linha de aquisição pode ser verificada a presença de casas sem a área de proteção de encosta.



Figura 43 – Linha 08, obtida ao longo da rua Mato Grosso.

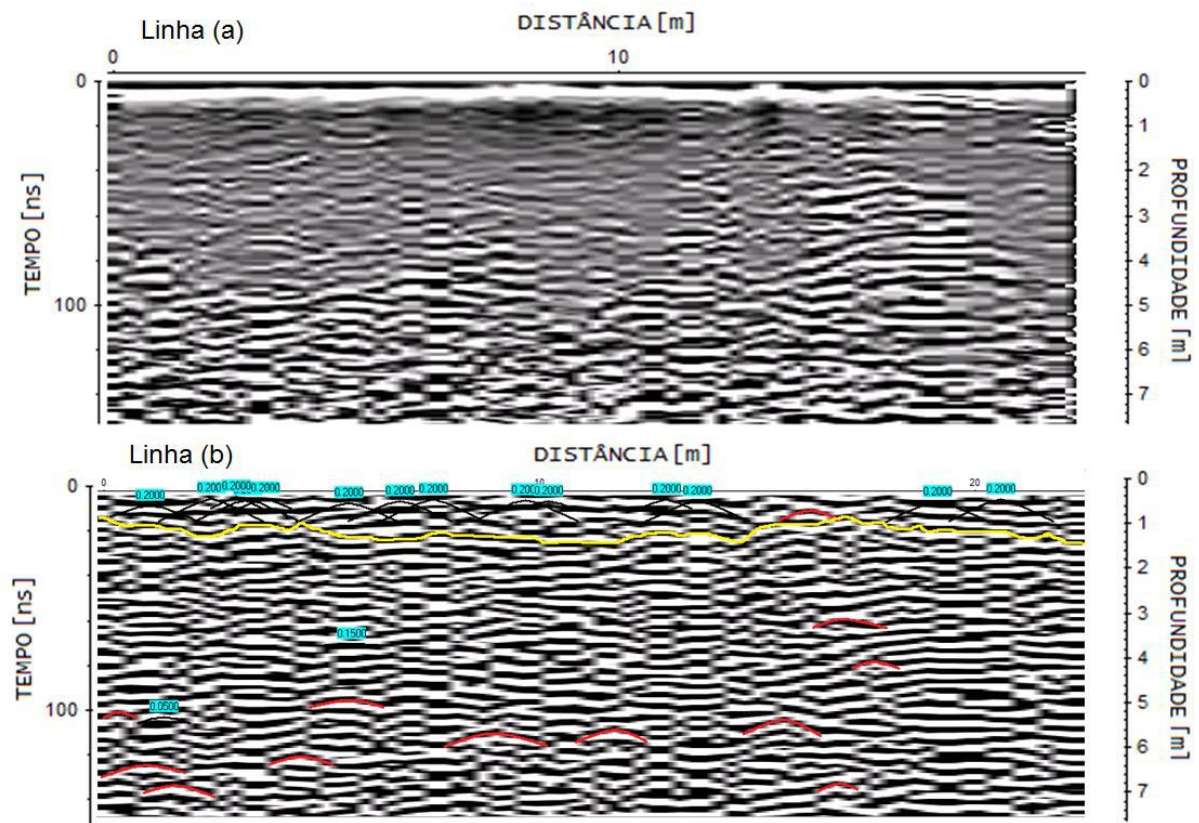


Figura 44 – Linha 08 não processada (a) e processada (b).

A linha 09 também possui aproximadamente 15 metros de extensão com direção W-E, obtida perpendicular a encosta. Superficialmente na área de aquisição, o solo apresenta-se areno-argiloso (figura 45). Na seção radargrama (Figura 46) é verifica uma interface em torno de 1 a 2 metros de profundidade o qual caracteriza o contato entre friável e solo compactado. No solo compactado é verificado a forma

hiperbólica que caracteriza fragmentos rochosos. Na seção radargrama não foi verificado a presença de embasamento e próxima a rua acima e abaixo de onde foram realizadas as aquisições de dados o terreno apresenta baixa declividade (aproximadamente 30^0). Sendo verificada em superfície a presença de fragmentos rochosos e concreção de solo. Abaixo da linha de aquisição pode ser verificada a presença de casas sem a área de com proteção de encosta.



Figura 45 – Linha 9, obtida ao longo da rua m,ato Grosso. Começa a entrar na área do deslizamento anterior.

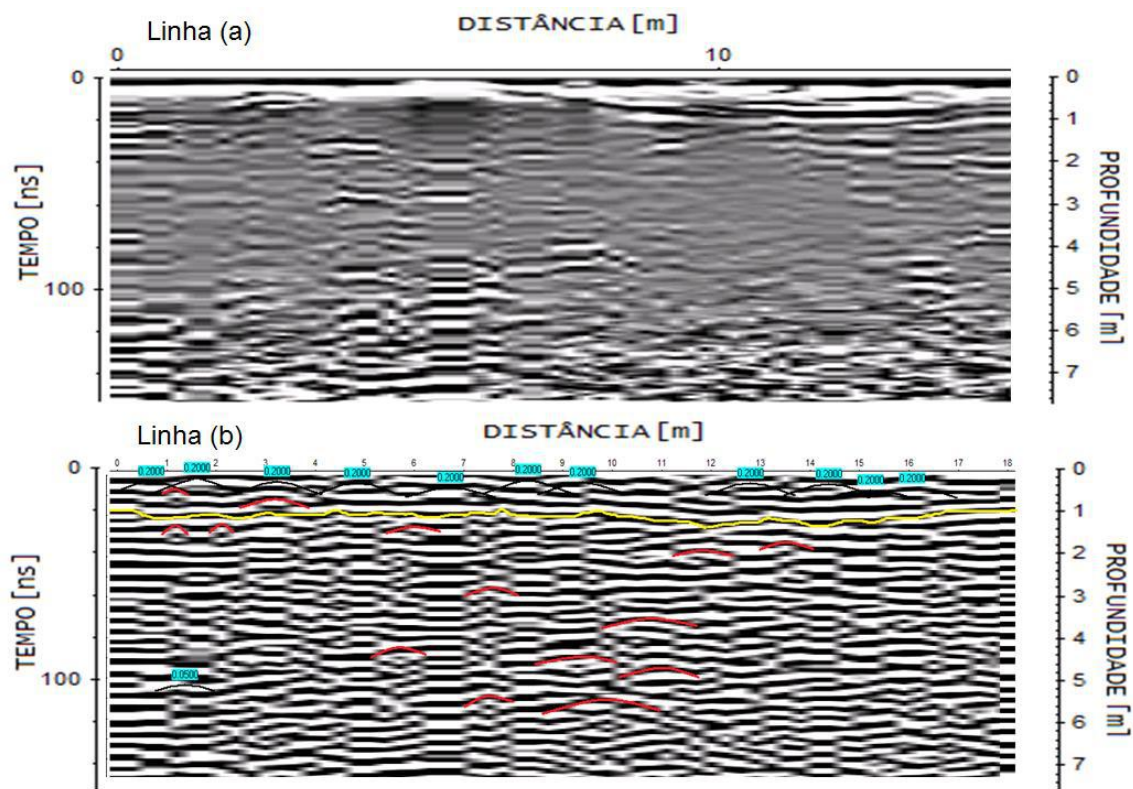


Figura 46 – Linha 9 não processada (a) e não processada (b).

A linha 10 com aproximadamente 15 metros de extensão com direção W-E, obtida perpendicular a encosta (figura 47). Superficialmente na área de aquisição, o

solo apresenta-se mais arenoso, e não tão maduro. Estruturas remanescentes da rocha original podem ser observadas o que caracteriza o solo dessa área como saprolítico, imaturo. Nesse local já havia ocorrido deslizamento anteriormente, o solo de composição arenosa é o mais propício a escorregamentos. Na seção radargrama (figura 48) é verifica uma interface em torno de 1 a 2 metros de profundidade o qual caracteriza o contato entre friável e solo compactado. No solo compactado é verificada a forma hiperbólica que caracteriza fragmentos rochosos. Nesta área é verificada a maior presença de vegetação acima da encosta, o que também é um fator agravante para ocorrência de escorregamentos.



Figura 47 – Linha 10, obtida ao longo da rua Mato Grosso. Apresenta, como é possível ver às margens, um solo de cor acinzentada, com estruturas remanescentes da rocha original (saprolítico). Um solo classificado como jovem, bem arenoso, o que o condiciona mais a eventos de deslizamento

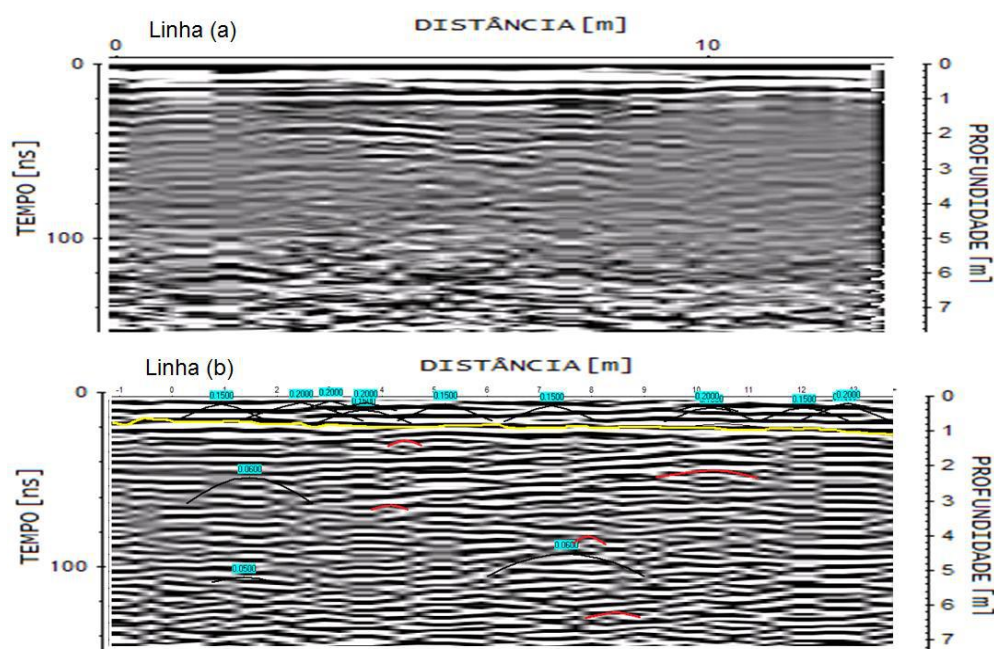


Figura 48– Linha 10 não processada (a) e processada (b).

A linha 11 possui aproximadamente 15 metros de extensão com direção N-S, obtida perpendicular a encosta. Superficialmente na área de aquisição, o solo apresenta-se areno-argiloso com fragmentos rochosos com variações de cm a metros (figura 49). Superficialmente na área de aquisição, o solo apresenta-se mais arenoso, e não tão maduro. Estruturas remanescentes da rocha original podem ser observadas o que caracteriza o solo dessa área como saprolítico, imaturo. Nesse local já havia ocorrido deslizamento anteriormente, o solo de composição arenosa é o mais propício a escorregamentos. Na seção radargrama (figura 50) é verificada uma interface em torno de 1 a 2 metros de profundidade o qual caracteriza o contato entre solo friável e solo compactado. No solo compactado é verificada a presença de formas hiperbólicas que caracterizam fragmentos rochosos. Nesta área é verificada a maior presença de vegetação acima da encosta, o que também é um fator agravante para ocorrência de escorregamentos.



Figura 49 – Linha 11, obtida ao longo da rua Mato Grosso.

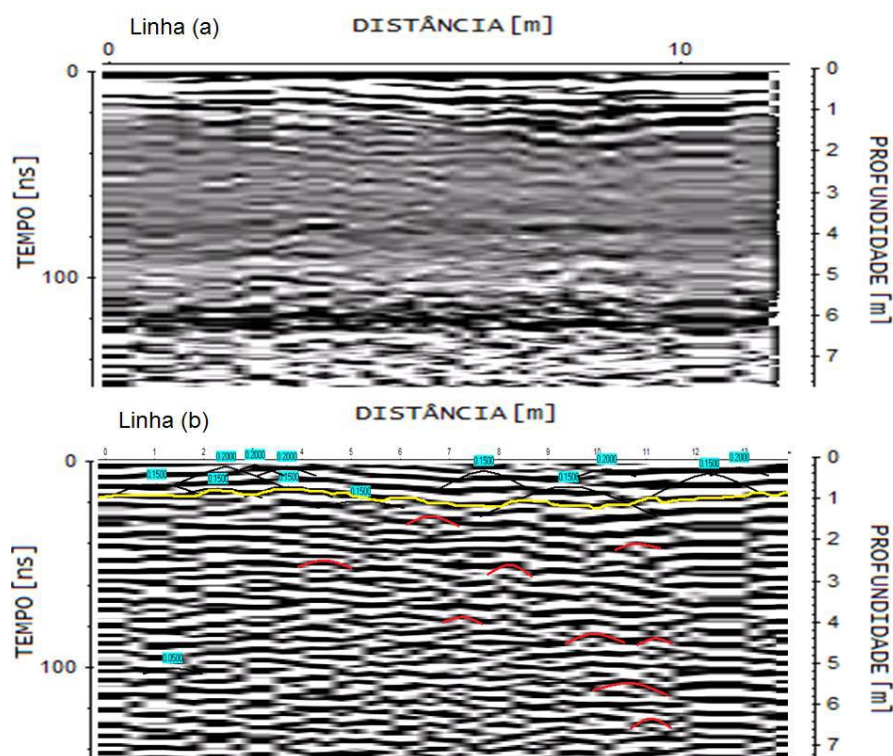


Figura 50 – Linha 11 não processada (a) e processada (b).

A linha 12 possui aproximadamente 35 metros de extensão com direção NW-SE, obtida perpendicular a encosta. Superficialmente na área de aquisição, o solo apresenta-se areno-argiloso com fragmentos rochosos com variações de cm a metros (figura 51). Superficialmente na área de aquisição, o solo apresenta-se mais arenoso, e não tão maduro. Estruturas remanescentes da rocha original podem ser observadas o que caracteriza o solo dessa área como saprolítico, imaturo. Nesse local já havia ocorrido deslizamento anteriormente, o solo de composição arenosa é o mais propício a escorregamentos. Na seção radargrama (figura 52) é verificada uma interface em torno de 1 a 2 metros de profundidade o qual caracteriza o contato entre solo friável e solo compactado. No solo compactado é verificada a presença de formas hiperbólicas que caracterizam fragmentos rochosos. Nesta área foi verificada a maior presença de vegetação acima da encosta, o que também é um fator agravante para ocorrência de escorregamentos.



Figura 51 – Linha 12, obtida ao longo da rua Mato Grosso.

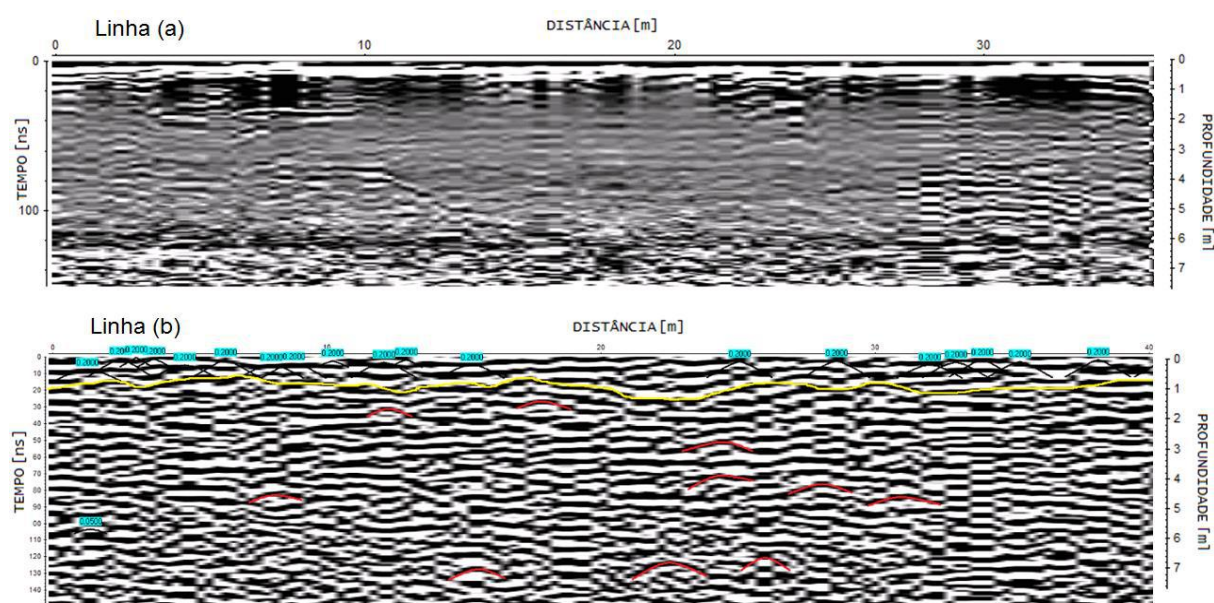


Figura 52 – Linha 12 não processada (a) e processada (b).

Nas seções radargramas das linhas 10, 11 e 12 não foi verificado a presença de embasamento e próxima a rua, acima e abaixo de onde foram realizadas as aquisições de dados, o terreno apresenta baixa e alta declividade (aproximadamente 30° e 50°). Foi verificada em superfície a presença de fragmentos rochosos. Abaixo da linha de aquisição pode ser verificada a presença de casas sem a área de proteção de encosta.

5. CONCLUSÃO

Foi verificado nas seções radargramas uma interface que separa os solos inconsolidados e consolidados, sendo que nas linhas 01 e 02 não havia a presença de vegetação, além de ser uma área convexa. As linhas entre (03 a 09) a maior parte do perfil são em áreas convexas e as linhas (10, 11 e 12) em área côncava, com presença de vegetação e também maior incidência de drenagens, sendo que essas últimas linhas já haviam ocorrido casos de deslizamentos de solo em 2011. As seções embora tenham sido obtidas em solos com granulometria diferentes, essas não expressaram diferenças marcantes nos refletores em respostas as ondas eletromagnéticas. Uma interface foi identificada em praticamente todos os perfis, sendo que tal interface mostra a separação de solos com diferentes teores de consolidação. Com aproximadamente 1 metro de profundidade em todos os perfis, esta camada mostra uma separação marcante do solo, sendo que não houveram maiores resultados em relação a interpretação de estruturas subsuperficiais. Nos solo argiloso a drenagem é muito mais lenta e quase nunca estes solos estão completamente secos. Em algumas situações, no entanto, a drenagem desempenha um papel. Se a drenagem for muito fraca, então os sedimentos porosos, de grãos grosseiros, reterão a umidade por longos períodos após um evento de chuva.

Assim o trabalho mostra certa viabilidade dos estudos GPR na identificação de estruturas e possíveis interfaces que podem ser identificadas com intuito de mostrar as zonas do solo propícias a serem futuras superfícies de ruptura, após eventos de chuva, por exemplo. O uso do GPR neste tipo de aplicação e investigação ainda é uma novidade no meio acadêmico sendo assim maior a necessidade de novos trabalhos na área de aplicação a estabilidade de encostas.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, F. O.; ROCHA, L. F. R.; CARELLI, S. C. & PLASTINO, R. H. Investigação Geofísica visando a Modelagem de Cordões Arenosos da Baía de Sepetiba, Itaguaí, Estado do Rio de Janeiro, Brasil. 1998.
- AVELAR, A. S.; COELHO NETTO, A. L.; LACERDA, W. A.; BECKER, L. B. & MENDONÇA, M. B. Mechanism of the Recent Catastrophic Landslides in the Mountainous Range of Rio de Janeiro, Brazil. 2011.
- ANDY, A. B.; SAAD R. & MUZTAZA, M. M. Geophysical and Geotechnical Engineering Assessment of Slope Stability and Clayey Sand Soil's Behaviour Analysis. Asia Pacific Conference on Environmental Science and Technology Advances in Biomedical Engineering, Vol.6. 2012.
- BRESSANI, L. A.; PINHEIRO, R. J. B.; BICA, A. V. D.; EISENBERGER, C. N. & SOARES, J. M. D. Movements of a Large Urban Slope in Town of Santa Cruz do Sul (RGS), Brazil. In: 10th INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON LANDSLIDES AND ENGINEERED SLOPES, 2008, Xi'an, China. Proceeding. Xi'an: Chinese Institution of Soil Mechanics, 2008, p. 1-8.
- BRESSANI, L. A. Carta 18 jan 2011. Disponível em <https://sites.google.com/site/luizbressani/escorregamentos/textos/carta-18-jan-2011>
- CIDE (Centro de Informações do Rio de Janeiro). 2000.
- CHAMBERS, J. E.; MELDRUM, P. I.; WILKINSON, P. B.; GUNN, D. A.; KURAS, O.; WRAGG, J. and MUNRO, C. Geophysical-geotechnical Sensor Networks for Slope Stability Monitoring. Berichte Geol. B.-A., 93, ISSN 1017 8880 – Applications in Landslide Monitoring. 2011.
- COELHO NETTO, A. L.; SATO, A. M.; AVELAR, A. S.; VIANNA, L. G. G.; ARAÚJO, I. S.; FERREIRA, D. L. C.; LIMA, P. H.; SILVA, A. P. A. & SILVA, R. P. January The extreme landslide disaster in Brazil. 2011.
- CUNHA, S. B & GUERRA, A. J. T. A questão ambiental: Diferentes abordagens. 4ª edição, Rio de Janeiro, Bertrand Brasil, 2008.
- CRUDEN, D. M. A Simple Definition of a Landslide. Bulletin Of the International Association of ENGINEERING GEOLOGY. Number 43. Paris, 1991.

DOURADO J. C.; MALAGUTTI W. F.; BRAGA, A. C. O. & NAVA, N. Detecção de Cavidades em Arenitos utilizando Gravimetria, Eletorresistividade e GPR. *Brazilian Journal of Geophysics*, Vol. 19(1), 2001.

DOURADO, F.; ARRAES, T. C. & SILVA, M. F. O Megadesastre da Região Serrana do Rio de Janeiro – as Causas do Evento, os Mecanismos dos Movimentos de Massa e a Distribuição Espacial dos Investimentos de Reconstrução no Pós-Desastre. *Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ*. Disponível em www.anuario.igeo.ufrj.br. 2013.

EMBRAPA, Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Ministério de Agricultura e do Abastecimento. p. 412. Brasília-DF, 1999.

GUERRA, A. T. Novo Dicionário Geológico-geomorfológico / 3ª edição, Rio de Janeiro, Bertrand Brasil, 2003.

HANSEN, M. J. Strategies for Classification of Landslides. In *Slope Instability*. pp. 1 - 25. 1984

HACK, R. Geophysics for Slope Stability. *Surveys in Geophysics* 21: 423–448, Kluwer Academic Publishers. 2000.

HANNINEN, Pi. Application of Ground Penetrating Radar and Radio Wave Moisture Probe Techniques to Peatland Investigations. Ed the Finnish Geotechnical Society. Londres 64 pgs. 1992.

HIGHLAND, L. O. Manual de Deslizamento – Um Guia para a Compreensão de Deslizamentos. Serviço Geológico dos Estados Unidos e Peter Bobrowsky, Serviço Geológico do Canadá. 2008.

JONGMANS, D. & GARAMBOIS, S. Geophysical investigation of landslides: A review. *Bulletin Société Géologique de France* 178, 2 ,101-112. 2007.

NERY T. D. Dinâmica das Corridas de Detritos no Litoral Norte de São Paulo. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Geografia Física, Departamento da Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas da Universidade de São Paulo. 2016.

NEVES, C. M. M.; FARIA, O. B.; ROTONDARO, R.; SALAS, P. C. & HOFFMANN, M. Seleção de Solos e Métodos de Controle em Construção com Terra – práticas de campo. *PROTERRA Projeto de Investigação XIV*.6. 2005.

REIS, S.. *Revista Veja*. 2011.

- SALGADO, J. C. R. S. S. Avaliação e Modelação da Suscetibilidade d Movimentos de Vertente Superficiais Translativos em Nova Friburgo. Dissertação. Faculdade De Letras Universidade do Porto. 2013.
- SILVA, A, M. S. F. M. S. O Uso do Radar de Penetração no Solo (GPR) em Estudo de Afloramento Carbonático do Membro Cráto da Formação Santana na Bacia do Araripe Ceará (CE) - Brasil. 2013.
- SOUZA, J. M.; ASEVEDO, L. A.; SOARES, I. L. P. & BERTOLINO, A. V. F. A. Movimentos de Massa na Bacia do Rio São Pedro, Município de Nova Friburgo, Associado ao Evento de Janeiro de 2011. ACTA Geográfica, Boa Vista, Ed. Esp. Climatologia Geográfica, pp.149-163. 2012
- TUPINAMBÁ, M. (*et al.*) Geologia e Recursos Minerais da folha Nova Friburgo SF.23-Z-B-II, estado do Rio de Janeiro escala 1:100.000;organizador Luiz Carlos da Silva.Belo Horizonte: CPRM, 2012.
- ULRIKSEN, C. P. F. Application of Impulse Radar to Civil Engineering. Ph.D. thesis, Lund Univ. of Technology, Lund, Sweden.179pp. 1982.
- VARNES, D. J. Slope Movement Types and Processes. In: Schuster, R.L., Krizek, R.J. (Eds.), Landslides: An Analysis and Control, Special Report 176, Transportation Research Board, National Research Council, National Academy of Sciences, Washington, DC, pp.11–33.1978.
- ZHOU, C. H.; Lee, C. F; Li, J. & Xu, Z. W. On the Spatial Relationship between Landslides and Causative Factors on Lantau Island, Hong Kong.GeomorphologyVolume 43, Issues 3 – 4, 1, Pages 197–207. March 2002.